



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KOEXISTENCE KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ V PÁSMU ISM

COEXISTENCE OF THE COMMUNICATION SYSTEMS IN ISM BAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAN NOWAK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN PROKOPEC, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Dan Nowak

ID: 78641

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Koexistence komunikačních systémů v pásmu ISM

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte technologie fyzické vrstvy komunikačních systémů, které pracují v pásmu ISM 2400-2483,5 MHz (WiFi, Bluetooth, ZigBee). Navrhněte a vytvořte model pro simulaci koexistence v prostředí Matlab/Simulink. Model bude obsahovat výše zmíněné tři systémy (WiFi, Bluetooth, ZigBee).

Proveďte měření koexistence systémů na fyzické vrstvě v pásmu ISM a srovnajte naměřené vlastnosti s výsledky získanými při simulaci. Zpracujte podrobnou zprávu o výsledcích simulací a měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] THOMPSON, R., A., TIPPER, D., KABARA, J., KRISHNAMURTHY, P., BANERJEE, S. The Physical Layer of Communications Systems. Boston: Artech House, 2006. ISBN: 1-58053-657-3

[2] PRASAD, R., DENEIRE, L. From WPAN's to Personal Networks: Technologies and Applications. Boston: Artech House, 2006. ISBN: 1-58053-826-6.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Cílem této práce je prostudovat technologie fyzické vrstvy komunikačních systémů Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee pracujících v pásmu ISM, popsat mechanismy koexistence těchto systémů v uvedeném frekvenčním pásmu, následně vytvořit modely fyzických vrstev v rozhraní Simulink, simulovat současné vysílání zařízení a upravit model tak, aby vyhovoval koexistenčním mechanismům dle standardu IEEE 802.15.2. V praktické části se práce zaměřuje na vliv výkonu Wi-Fi na přenosovou rychlost při společném vysílání s Bluetooth.

Abstract

The purpose of this work is to study the physical layer technology of the communication systems working in the ISM band, to describe coexistence mechanisms in the selected frequency band, consequently to create models of the physical layers in the Simulink interface, to simulate synchronous transmission of the devices and to modify the model in order to correspond with coexistence mechanisms described in IEEE standard 802.15.2. The practical part of this paper examines the effect of Wi-Fi device output power on the transmission speed during synchronous transmission with Bluetooth device.

Klíčová slova

Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, pásmo ISM, WLAN, WPAN, koexistence, fyzická vrstva, rušení, komunikační systémy, Simulink

Key Words

Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, ISM band, WLAN, WPAN, coexistence, physical layer, interference, communication systems, Simulink

NOWAK, D. *Koexistence komunikačních systémů v pásmu ISM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Koexistence komunikačních systémů v pásmu ISM jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 3. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Prokopcovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 3. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1	Obecná charakteristika problému rušení	4
2	Obecné charakteristiky systémů	4
2.1	Wi-Fi	4
2.2	Bluetooth	5
2.3	ZigBee	5
3	Popis fyzických vrstev (PHY)	6
3.1	Wi-Fi	6
3.1.1	Obecná charakteristika PHY	6
3.1.2	Funkce PHY	6
3.1.3	Frekvenční rozsah a typ modulace	7
3.2	Bluetooth	7
3.2.1	Obecná charakteristika PHY	7
3.2.2	Funkce PHY	7
3.2.3	Frekvenční rozsah a typ modulace	8
3.3	ZigBee	8
3.3.1	Obecná charakteristika PHY	8
3.3.2	Funkce PHY	9
3.3.3	Frekvenční rozsah a typy modulace	9
4	Koexistence Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee v pásmu ISM	10
4.1	Alternating wireless medium access	10
4.2	Adaptive frequency-hopping	11
4.3	Adaptive interference suppression	12
5	Simulace v prostředí Simulink	14
5.1	Popis modelu Wi-Fi	14
5.1.1	Vysílač	14
5.1.2	Přijímač	15
5.1.3	Výsledky simulace	16
5.2	Popis modelu Bluetooth	17
5.2.1	Vysílač	17
5.2.2	Přijímač	18
5.2.3	Výsledky simulace	18
5.3	Popis modelu ZigBee	19
5.3.1	Vysílač	19
5.3.2	Výsledky simulace	22
5.4	Propojení modelů	23
5.4.1	Wi-Fi a Bluetooth	23
5.4.2	Wi-Fi a ZigBee	25
5.4.3	Bluetooth a ZigBee	27
5.4.4	Spojený model Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee	28
5.5	Návrh koexistenčního řešení	30
5.5.1	Wi-Fi a Bluetooth	30
5.5.2	Wi-Fi a ZigBee	31
5.5.3	Bluetooth a ZigBee	34
5.5.4	Koexistenční řešení systémů Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee	34
6	Laboratorní měření	37
7	Shrnutí	39
8	Seznamy	40
8.1	Seznam použité literatury	40
8.2	Seznam obrázků	42
8.3	Seznam zkratk	43

1 Obecná charakteristika problému rušení

Protože standardy IEEE 802.11b (bezdrátové sítě **WLAN**: např. Wi-Fi) a IEEE 802.15 (bezdrátové sítě **WPAN**: Bluetooth, ZigBee) využívají ke svým operacím bezlicenční frekvenční pásmo ISM 2,4GHz, jsou jejich signály vystaveny vzájemnému rušení, které se může projevit snížením výkonu. Rušení je dáno mnoha faktory, zejména vzdáleností jednotlivých zařízení, množstvím posílaných dat, výkony zařízení a přenosovou rychlostí bezdrátové sítě WLAN. Rovněž různé typy dat posílaných bezdrátovými sítěmi mohou být různě náchylné na rušení.

Tři výše zmíněné systémy používají různé metody modulace. Nejviditelnějším rozdílem je, že IEEE 802.15 používá **FHSS** (metoda rozprostírání pomocí frekvenčního přeskokování), zatímco IEEE 802.11b může kromě FHSS používat i techniku **DSSS** (direct-sequence spread spectrum), jenž je u WLAN v poslední době využívanější.

Dosah WLAN je okolo 100 metrů, zatímco signál WPAN dosahuje pouze 10 metrů, což je dáno vyšším výkonem zařízení WLAN. Vyšší dosah WLAN proto může překrýt a rušit WPAN. Kvůli vzrůstající oblíbenosti WLAN může být oblast pokryta více těmito signály. Pokud dvě zařízení využívají různé kanály ve stejném prostoru, pásmo ISM se stává plně obsazeným a znemožňuje práci systému FHSS pro WPAN.

Ke snížení vzájemného rušení byl vytvořen standard **IEEE 802.15.2** obsahující několik koexistenčních mechanismů, které umožňují WLAN a WPAN pracovat ve sdíleném prostředí bez vzájemného ovlivňování výkonů. Standard definuje dva druhy mechanismů – **kolaborativní** a **nekolaborativní**.

Kolaborativní koexistenční mechanismy potřebují komunikaci a výměnu informací mezi WLAN a WPAN. Tyto mechanismy ale mohou být použity pouze v případě, že WLAN a WPAN jsou umístěny ve stejném zařízení (např. Wi-Fi a Bluetooth v notebooku).

Nekolaborativní mechanismy nevyžadují výměnu informací mezi bezdrátovými sítěmi. Následkem toho, že pracují nezávisle, je potřeba zjišťovat přítomnost druhého zařízení.

2 Obecné charakteristiky systémů

2.1 Wi-Fi

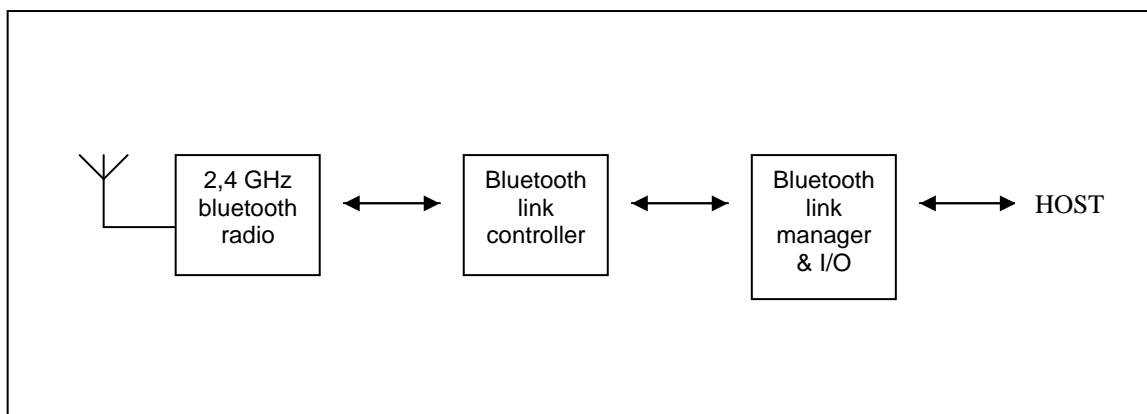
Wi-Fi je standard pro lokální bezdrátové sítě (*Wireless LAN*, WLAN) vycházející ze specifikace IEEE 802.11. Původním cílem Wi-Fi sítí bylo zajišťovat vzájemné bezdrátové propojení přenosných zařízení a jejich připojování na lokální (např. firemní) síť LAN. S postupem času začal být silný potenciál této technologie

využíván i k bezdrátovému připojení do sítě Internet. Později se Wi-Fi stala standardní součástí mobilních počítačů.[11] Wi-Fi se rozšířilo hlavně díky využívání bezlicenčního pásma ISM, což má negativní důsledky ve formě silného rušení příslušného frekvenčního spektra a častých bezpečnostních incidentů.

2.2 Bluetooth

Technologie Bluetooth byla zamýšlena jako bezdrátové rozhraní mezi zařízeními, které člověk používá při své každodenní činnosti: PC, klávesnice, myši, mobilní telefony, PDA, GPS aj. Vzhledem k parametrům standardu aplikace Bluetooth není vyloučeno použití i v průmyslovém prostředí pro propojení senzorů, akčních členů, pro telemetrii a přenos informací v měřicích systémech.[12] Pro průmyslové využití se ale častěji používá standard ZigBee.

Základní koncept zařízení Bluetooth je uveden na obr. 2.1. Blok Bluetooth radio obstarává veškerou činnost spojenou s analogovou částí vysílání a příjmu, Link Controller řídí činnost rádiové části, komunikaci v síti i komunikaci s hostitelským zařízením a Link Manager je rozhraním mezi Bluetooth zařízením a uživatelskou aplikací.[10]



obr. 2.1: Základní koncept Bluetooth zařízení [10]

2.3 ZigBee

ZigBee je schválen jako mezinárodní standard označovaný též jako IEEE 802.15.4. V roce 2002 založená ZigBee Alliance sdružuje přes 150 firem (Texas Instruments, Analog Devices, Cisco Systems, Freescale Semiconductors, Motorola,...) a vzájemnou spoluprací realizují spolehlivé, nízkonákladové a nízkopříkonové bezdrátově propojené kontrolní a řídicí produkty.

ZigBee je jednoduchý bezdrátový komunikační standard, který umožňuje vzájemnou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenost desítek metrů. Díky nízkým nárokům na hardware a nízké spotřebě se uplatňuje v oblasti řízení budov, spotřební elektroniky a průmyslu, například v podobě bateriově napájených bezdrátových senzorů. V současnosti se již pracuje na verzi 1.1.[13]

3 Popis fyzických vrstev (PHY)

3.1 Wi-Fi

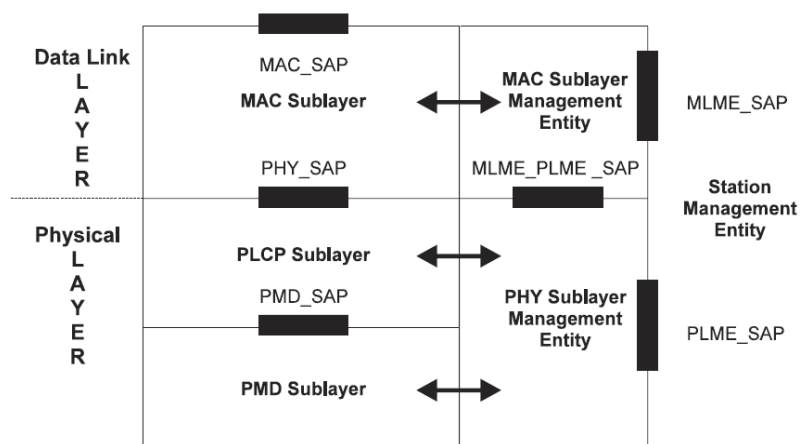
3.1.1 Obecná charakteristika PHY

Fyzická vrstva Wi-Fi dle standardu IEEE 802.11 zajišťuje dvě funkce:

1. Funkce fyzické vrstvy, která přizpůsobuje kapacity **PMD** systému. Tato funkce je podporována **PLCP**, která definuje metodu mapování **MPDU** do formátu vhodného pro vysílání a přijímání uživatelských dat a řídicích informací mezi dvěma stanicemi ve sdruženém PMD systému.
2. PMD systém, jehož funkce definuje charakteristiky a metody vysílání a přijímání dat pomocí bezdrátového média mezi dvěma či více stanicemi.[2]

3.1.2 Funkce PHY

Definice PHY obsahuje tři funkční entity (objekty): PMD, PLCP a PLME. Model architektury je na obr. 3.1.



obr. 3.1: Model architektury PHY Wi-Fi [2]

- Podvrstva **PMD** poskytuje metody k vysílání a přijímání dat bezdrátovými médii mezi dvěma či více stanicemi.
- Aby mohla vrstva MAC pracovat s co nejmenší závislostí na PMD, byla vytvořena podvrstva **PLCP**, která zjednodušuje rozhraní mezi službami vrstev PHY a MAC.
- **PLME** zajišťuje správu lokálních funkcí PHY ve spojení s entitou pro správu MAC vrstvy.
- **PHY-SAP** poskytuje služby vrstvy PHY vrstvě MAC.
- **PMD-SAP** označujeme sadu základních funkcí pro popis rozhraní mezi podvrstvami PLCD a PMD.
- **MLME-PLME-SAP** jsou entity pro výměnu informací mezi funkcemi spravujícími vrstvy MAC a PHY.

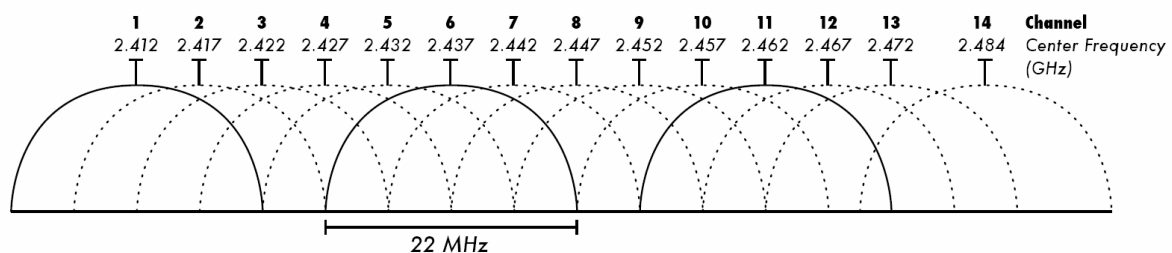
- **PLME-SAP** umožňuje funkci spravující stanici přístup k informacím z funkce spravující PHY.[2]

3.1.3 Frekvenční rozsah a typ modulace

Wi-Fi používá metodu přímého rozprostírání DSSS. Používají se dva typy této metody – prvním typem je rozprostírání násobením, které vyžaduje hodnoty užitečného signálu a posloupnosti ve tvaru ± 1 , druhou metodou je rozprostírání pomocí exkluzivního součtu XOR. Druhá metoda vyžaduje signál (sekvenci) v binárním tvaru. V přijímači dochází nejdříve k násobení přijatého signálu posloupností a poté v integračním článku dochází k integrování výsledku. Pokud je přijatý signál násoben správnou posloupností, je na výstupu integrátoru užitečný signál, pokud je použita nesprávná posloupnost, na výstupu integrátoru je šum.[8]

V poslední době se rovněž stále častěji používá pokročilá modulace DSSS-OFDM dle standardu IEEE 802.11g. Tato modulace umožňuje dosáhnout přenosové rychlosti až 54Mb/s a součinnost se zařízeními standardu 802.11b.

Vysílání Wi-Fi v pásmu ISM je rozděleno do 13 překrývajících se kanálů (11 v Severní Americe, 14 v Japonsku). Nejvyužívanějšími jsou kanály 1, 7 a 13, které se navzájem nepřekrývají a proto je u nich nejmenší pravděpodobnost vzájemného rušení.[14]



obr. 3.2: Rozdělení kanálů Wi-Fi [14]

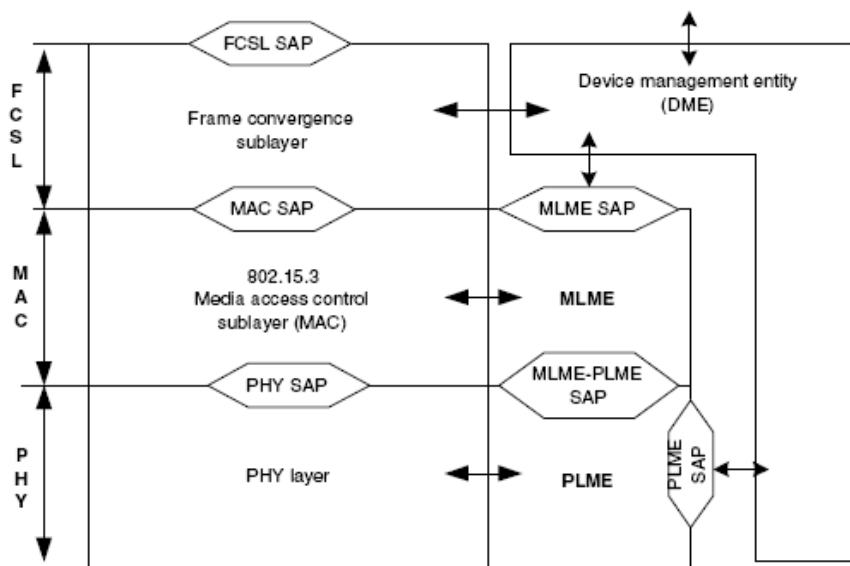
3.2 Bluetooth

3.2.1 Obecná charakteristika PHY

PHY podle standardu 802.15.3 je systém, jehož funkce definuje charakteristiky a metody vysílání a přijímání dat pomocí bezdrátového média mezi dvěma nebo více zařízeními.[6]

3.2.2 Funkce PHY

Definice PHY obsahuje dvě funkční entity (objekty): PHY a PLME. Model architektury je na obr.3.2.



obr. 3.3: Model architektury PHY Bluetooth [6]

- **PHY-SAP** poskytuje služby vrstvy PHY vrstvě MAC.
- **PLME** zajišťuje správu lokálních funkcí PHY ve spojení s entitou pro správu MAC vrstvy.
- **MLME-PLME-SAP** jsou entity pro výměnu informací mezi funkcemi spravujícími vrstvy MAC a PHY.
- **PLME-SAP** umožňuje funkci spravující zařízení přístup k informacím z funkce spravující PHY.[6]

3.2.3 Frekvenční rozsah a typ modulace

Standard Bluetooth je navržen jako bezdrátový komunikační standard, který v plné míře využívá komunikační frekvenční pásmo ISM a zaručuje tak kompatibilitu všech Bluetooth zařízení na celém světě. Komunikace využívá techniku FHSS k zajištění rychlého a bezpečného přenosu informací. Princip přenosu spočívá v dohodnutém sledu rádiových kanálů (RF channels), které mění nosný kmitočet dle vztahu:

$$f = 2402 + k \text{ MHz}, k = 0, \dots, 78. \quad (3.1) [10]$$

Odstup jednotlivých nosných v kmitočtových pásmech je tedy 1 MHz.[10] Pro snížení vzájemného rušení s rádiovými systémy, které toto pásmo rovněž využívají, používá systém Bluetooth přenos s rozprostřeným spektrem, a to variantu s kmitočtovým skákáním nosné vlny FHSS.

3.3 ZigBee

3.3.1 Obecná charakteristika PHY

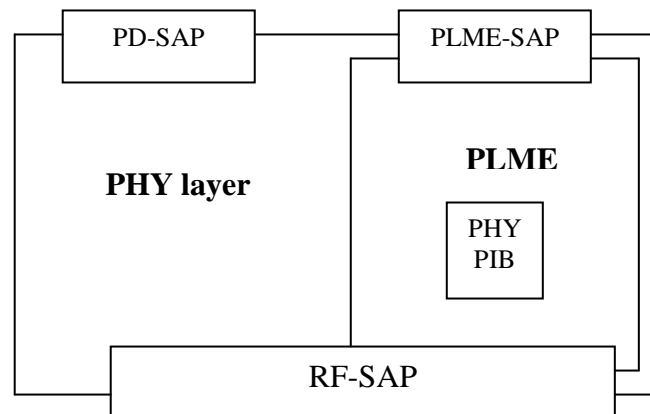
PHY je zodpovědná za následující úkoly:

- Aktivace a deaktivace rádiového spojení.
- ED (energy detection) - energetická detekce uvnitř aktuálního kanálu.

- LQI (link quality indication) - indikace kvality spojení pro přijímací pakety.
- CCA (clear channel assessment) určení volnosti kanálu pro CSMA-CA.
- Výběr frekvenčního kanálu.
- Datový přenos a příjem.[7]

3.3.2 Funkce PHY

Definice PHY obsahuje dvě funkční entity (objekty): PHY a PLME. Model architektury je na obr.3.3:



obr. 3.4: Model architektury PHY ZigBee [7]

- **PHY** poskytuje vzájemný vztah a komunikaci mezi MAC a fyzickým rádiovým kanálem, pomocí RF hardwaru a firmwaru.
- **PLME** poskytuje údržbu rozhraní během doby kdy je vrstva aktivní. Je také zodpovědná za údržbu databáze řízených objektů náležících k PHY. Tato databáze je označována jako informační základna **PIB**.
- PHY poskytuje dvě služby: datové služby fyzické vrstvy přístupné pomocí **PD-SAP** a správu vrstvy přístupnou díky **PLME-SAP**.

Další součástí vrstvy je takzvaný formát PPDU. Nejprve musejí být vysílány nebo přijímány nejméně významné bity - LSB. Každé PPDU je popsáno následujícími částmi:

- Synchronizační **hlavička SHR**, která dovoluje přijímacímu zařízení synchronizovat a udávat do bitového toku
- **PHY hlavička**, obsahující rámce o délce informace proměnné délky užitečných zařízení, která obsahuje podvrstva MAC[7]

3.3.3 Frekvenční rozsah a typy modulace

V pásmu ISM je vytvořeno 16 kanálů s přenosovou rychlostí 250 kbit/s a šířkou pásma 2 MHz, použitá modulace je zde O-QPSK (Offset QPSK). Obecně se dá šířka pásma popsat vztahem

$$f_c = 2405 + 5(k - 1)\text{MHz} \quad \text{pro } k = 11, 12 \dots 26, \text{ kde } k \text{ je číslo kanálu.} \quad (3.2) [7]$$

4 Koexistence Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee v pásmu ISM

Seznam koexistenčních mechanismů nabízené standardem IEEE 802.15.2:

kolaborativní:

- a) **AWMA** – Alternating wireless medium access
- b) **PTA** – Packet traffic arbitration
- c) **DIS** – Deterministic interference suppression

nekolaborativní:

- a) **AIS** – Adaptive interference suppression
- b) **APS** – Adaptive packet selection
- c) **AFH** – Adaptive frequency-hopping
- d) **Packet scheduling for ACL links**
- e) **Packet scheduling for SCO links**

Nejpoužívanějšími kolaborativními metodami jsou AWMA a PTA a mezi nekolaborativními je to AFH. Některé z těchto metod jsou stručně popsány níže.

4.1 Alternating wireless medium access

Tento mechanismus je založen na systému TDMA - časově rozděleného vícenásobného přístupu - který koordinuje bezdrátová zařízení, aby data přenášela střídavě. Přístupový bod WLAN periodicky vysílá signál. Interval je pomocí AWMA dále rozdělen na dva subintervaly, jeden pro WLAN, druhý pro WPAN.

Mechanismus AWMA využívá střídavého vysílání, aby zabránil vzájemnému rušení mezi jednotlivými zařízeními, proto musí být vysílače synchronizovány. Při použití AWMA musíme vzít v úvahu tři scénáře:

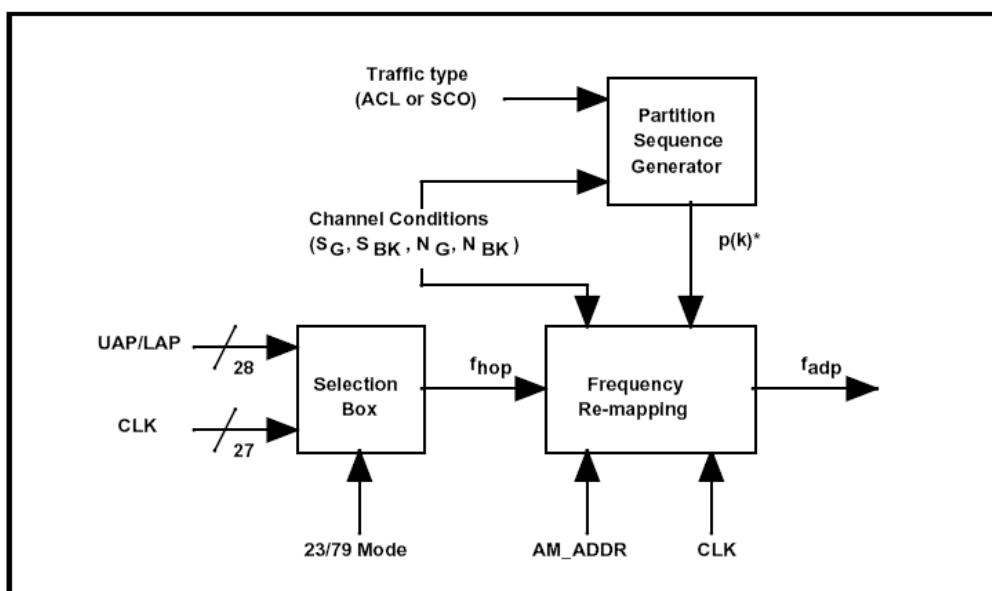
- a) Vysílače WLAN a WPAN jsou umístěny ve stejném fyzickém zařízení. Díky tomu mohou být vysílače jednoduše synchronizovány pomocí signálu poslaného ze zařízení WLAN do WPAN.
- b) Dvě nebo více zařízení WPAN tvoří síť pikonet a dvě nebo více zařízení WLAN je připojeno na stejný přístupový bod. Tato zařízení jsou v rámci pikonetu (resp. AP) synchronizována. Obě sady vysílačů jsou synchronizovány pomocí prázdného signálu poslaného mezi zařízeními WLAN a WPAN.
- c) Dvě nebo více zařízení WPAN tvoří síť pikonet a dvě nebo více stanic WLAN je připojeno k různým AP. Zařízení WLAN tedy nejsou synchronizována, což se řeší synchronizací přístupových bodů.

Pokud nejsou AP synchronizovány, třetí případ nemůže být řešen pomocí AWMA. V prvních dvou případech ale AWMA funguje i při nesynchronizovaných AP.[1]

4.2 Adaptive frequency-hopping

Tento nekolaborativní mechanismus dynamicky mění sekvenci přeskokování frekvencí zařízení WPAN, aby se vyhnul, nebo snížil rušení zařízeními WLAN. Procedura zahrnuje 4 části:

- a) Zjištění podpory AFH: Zjištění podpory se používá, aby master zařízení v rámci pikonetu zjistilo, zda slave zařízení podporují AFH a jejich parametry
- b) Klasifikace kanálů: Klasifikace se odehrává v zařízení master, výjimečně i ve slave. Je to proces, který přiřadí kanálům hodnotu „dobrý“ nebo „špatný“
- c) Výměna informací o klasifikaci kanálů: Master posílá informace o klasifikaci slave zařízením. Toto se děje pomocí příkazů AFH LPM
- d) Adaptivní přeskokování: Adaptivní přeskokování je operace přeskokování přes podskupinu kanálů[1]



obr. 4.1: Blokové schéma AFH [1]

Mechanismus AFH se skládá ze tří základních částí:

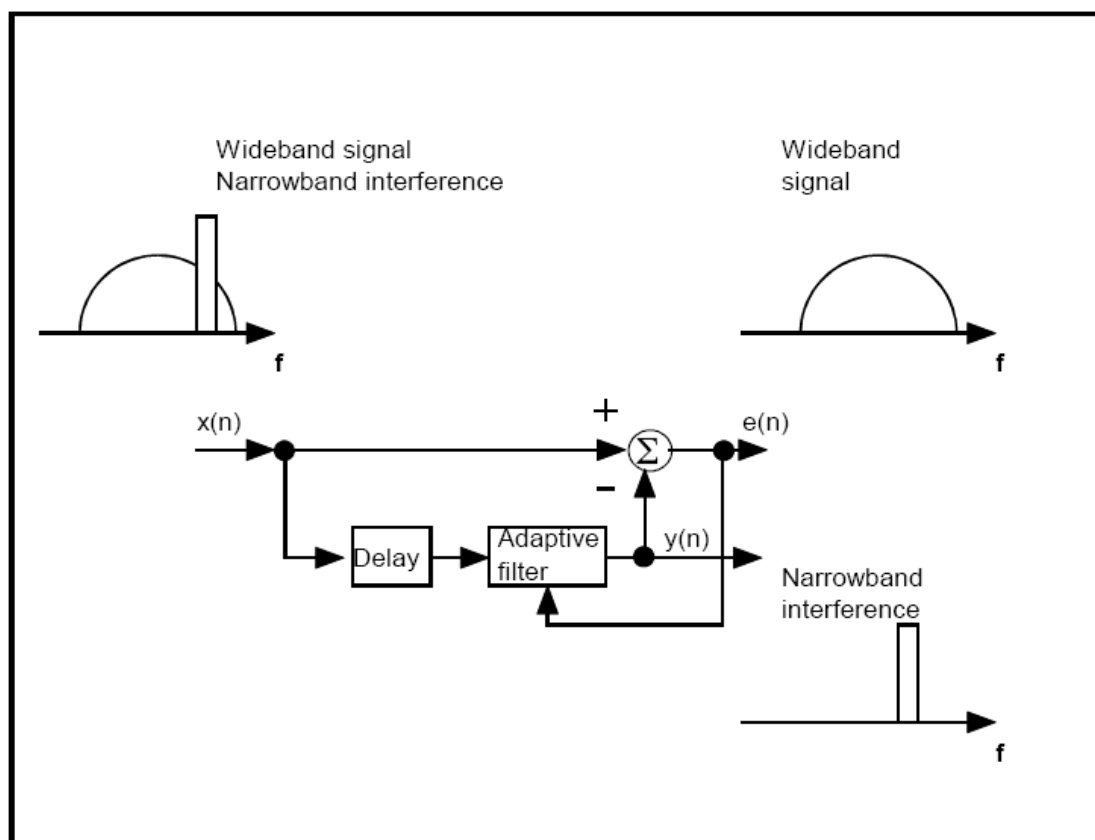
- a) *Selection box*, který generuje přeskokovací sekvenci
- b) *Partition sequence generator*, který zavede novou strukturu místo staré. Když je nová sekvence brána z pohledu „dobrých“ a „špatných“ kanálů, je to čistý vzor a skupiny přeskokovacích frekvencí jsou ze stejné sady. Nicméně když bereme v úvahu přeskokovací frekvence, sekvence stále vypadá náhodně.

- c) *Frequency re-mapping*, jenž generuje přizpůsobenou přeskovací frekvenci s příslušnou strukturou. Základní funkcí části je použít přeskovací frekvenci tvořenou první částí na sadu “dobrých” a “špatných” kanálů definovaných druhou částí. [1]

4.3 Adaptive interference suppression

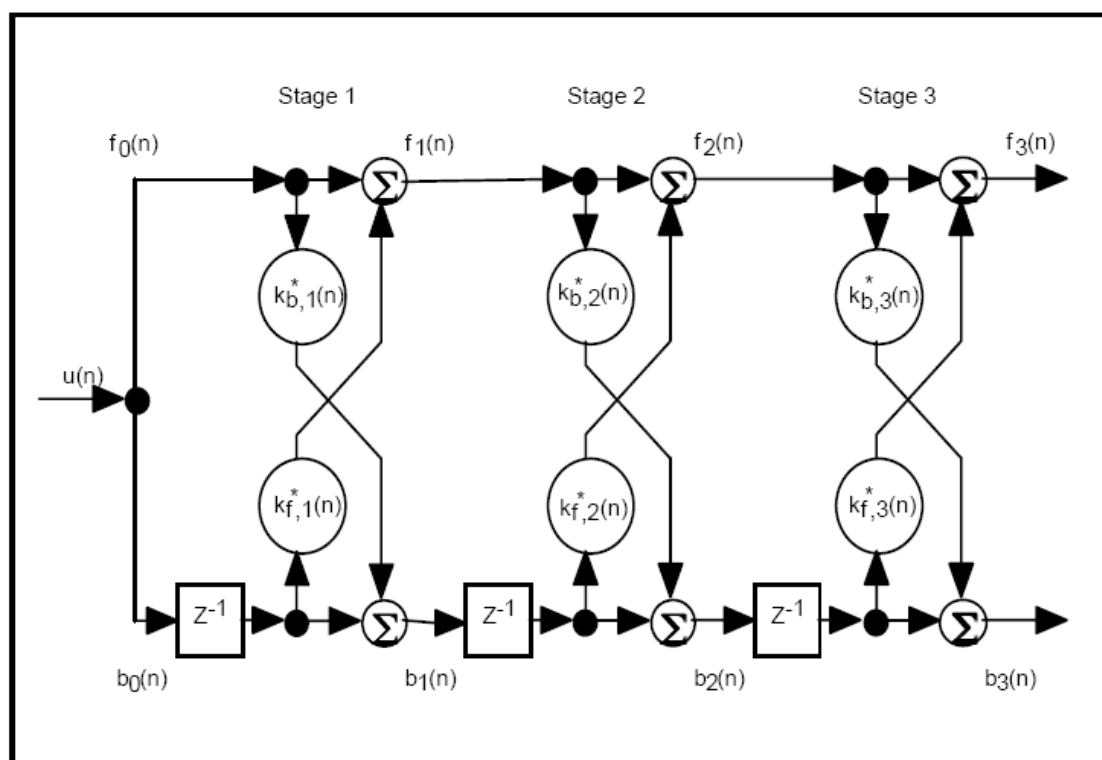
Při použití této metody zařízení WLAN nezná časování a frekvenci ostatních zařízení WPAN a používá adaptivní filtr k odhadu a vyrušení rušícího signálu. Blokové schéma systému je na obr. 4.2.

Obdržený signál $x(n)$ je zpožděn a poslán do adaptivního filtru, který využívá nekorelovanosti širokopásmového signálu WLAN k odhadování nechtěných úzkopásmových signálů WPAN, $y(n)$. Z obdrženého signálu se generuje předpokládaný chybový signál $e(n)$, který je aproximací signálu WLAN. Předpokládaný chybový signál se rovněž používá k adaptaci filtru.



obr. 4.2: Blokové schéma AIS [1]

Ke snížení počtu výpočtů během numerické stabilizace je adaptivní filtr implementován jako RLSL filtr (obr. 4.3), do něhož je zpoždění signálů přímo zabudováno. Hlavními parametry filtru jsou: $M = 3$ (řád mřížky) a $\lambda = 0,97$ (forgetting factor), který reprezentuje paměť algoritmu, kde $\lambda = 1$ odpovídá nekonečné paměti.



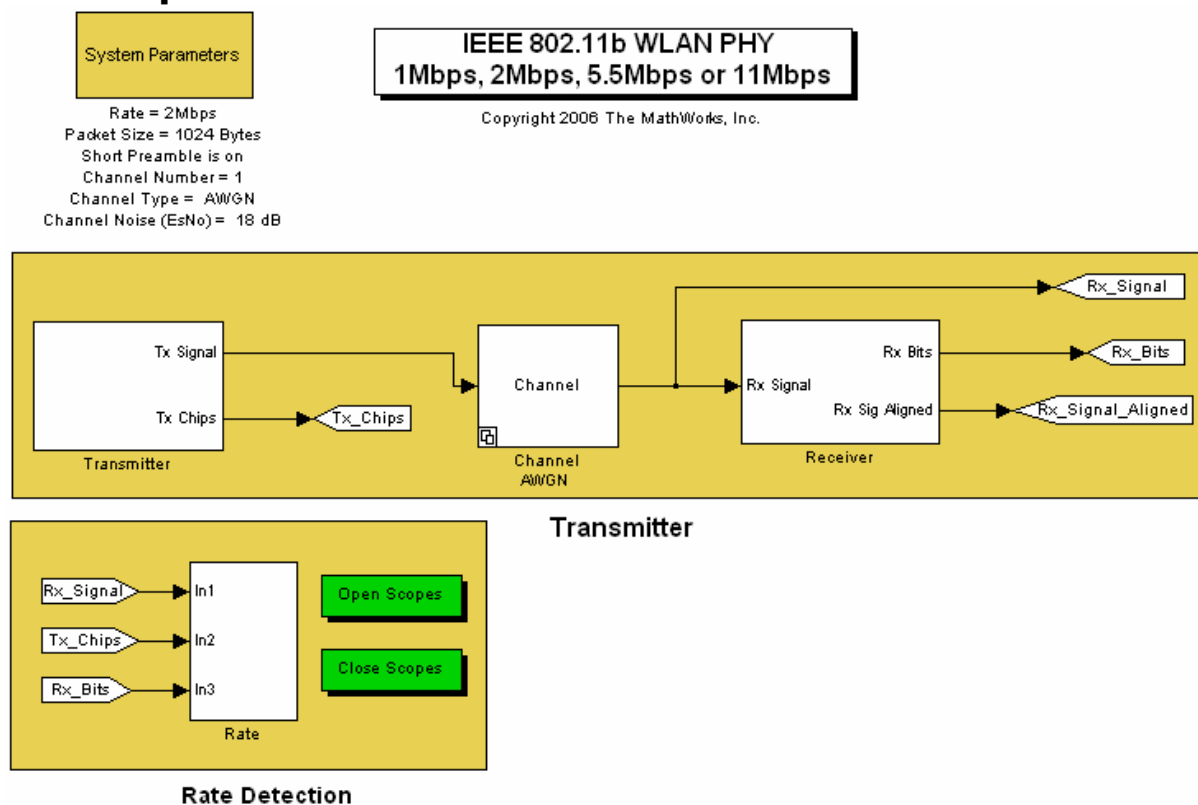
obr. 4.3: Třístupňový RLSL filtr [1]

Koeficienty odrazu $k_{f,i}$ a $k_{b,i}$ musí být aktualizovány pro každý stupeň filtru. Odhad $f_3(n)$ je pak na obr. 4.2 použit jako $y(n)$. [1]

5 Simulace v prostředí Simulink

K simulaci systémů Wi-Fi a Bluetooth v prostředí Simulink byly použity upravené modely, které Matlab obsahuje v základu – model *commwlan80211b*, který v této práci simuluje vysílání a příjem signálu ve fyzické vrstvě Wi-Fi dle standardu 802.11b a model *commbluetoothfreqhop*, který zastává funkci fyzické vrstvy vysílacího a přijímacího systému Bluetooth se zahrnutým frekvenčním přeskakováním. Model Wi-Fi byl upraven ze severoamerického typu na evropský typ, tj. přidáním kanálů 12 a 13. Zjednodušený model vysílače ZigBee byl vytvořen pro potřeby této práce. U výsledných spekter některých spojených modelů, jsou chybně zobrazeny řády frekvencí. Toto je způsobeno prostředím Simulinku, které mezi sebou násobí vzorkovací frekvence jednotlivých signálů. Všechny signály jsou ale vysílány v pásmu ISM.

5.1 Popis modelu Wi-Fi

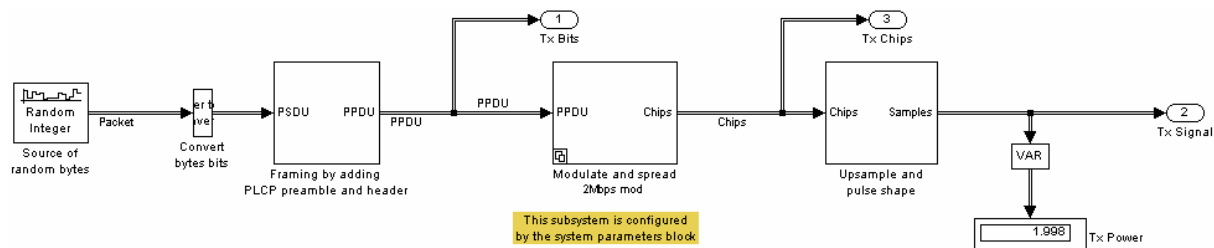


obr. 5.1: Model Wi-Fi

Model na obr. 5.1 obsahuje tři základní bloky – vysílač, přijímač a pomocí středního bloku Channel můžeme přidat aditivní bílý gausovský šum. Ostatní bloky umožňují nastavovat parametry systému a sledovat parametry signálu.

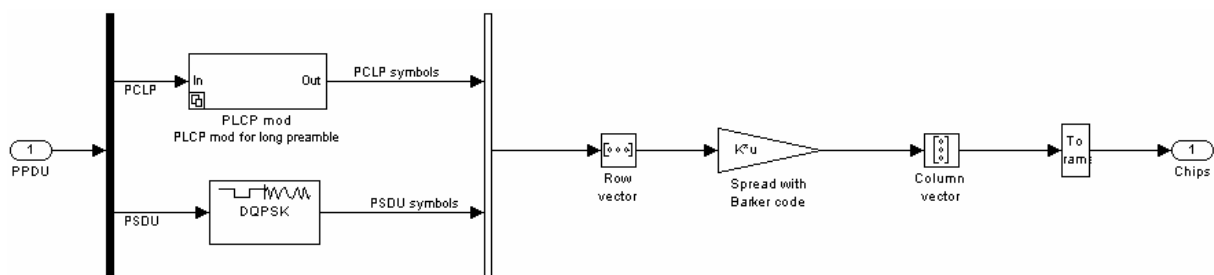
5.1.1 Vysílač

Model vysílače nejdříve náhodně generuje čísla datového typu integer v rozsahu $< 0, 255 >$. Tyto byty jsou převedeny na bity a je k nim přidána úvodní synchronizační skupina a hlavička PLCP.

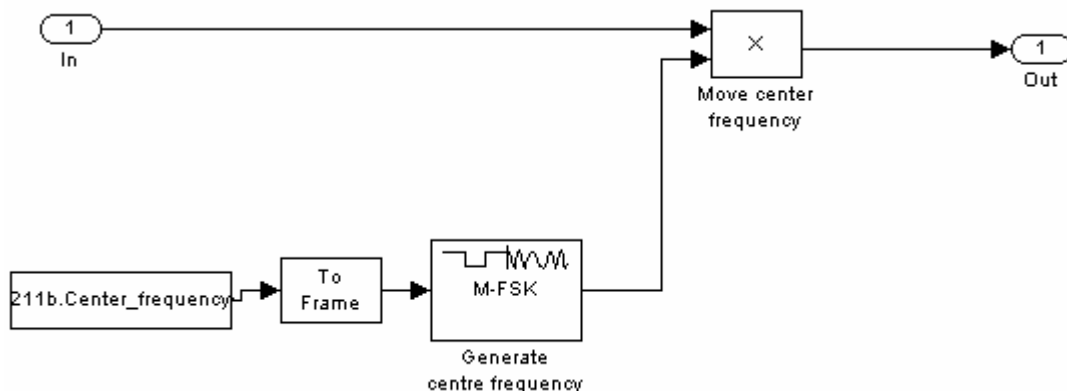


obr. 5.2: Model vysílače Wi-Fi

Paket PPDU je následně rozdělen – rámec PLCP je modulován pomocí DBPSK a rámec PSDU je modulován pomocí DQPSK. Výsledné sekvence symbolů jsou rozprostřeny Barkerovým kódem o délce 11 a výstupní chipsy jsou uspořádány do rámců. Signál je poté tvarován RRC filtrem a střední frekvence je pomocí modulační M-FSK posunuta na žádaný kanál Wi-Fi, během čehož se vzorkovací frekvence zvýší o násobek počtu vzorků na 1 chip.



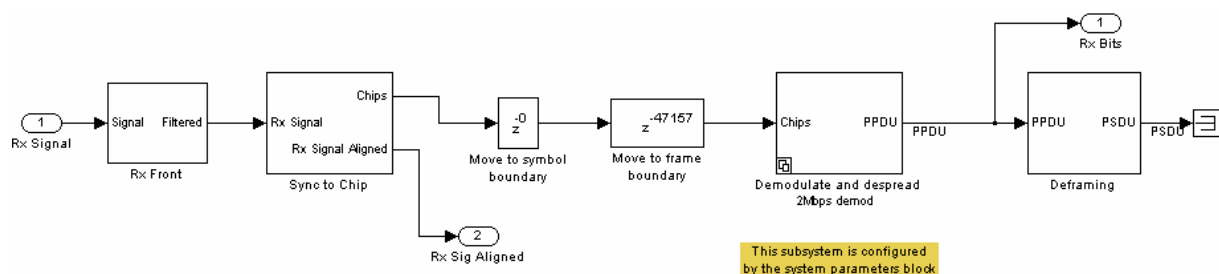
obr. 5.3: Fázová modulace a rozptření signálu Wi-Fi



obr. 5.4: Frekvenční modulace signálu Wi-Fi

5.1.2 Přijímač

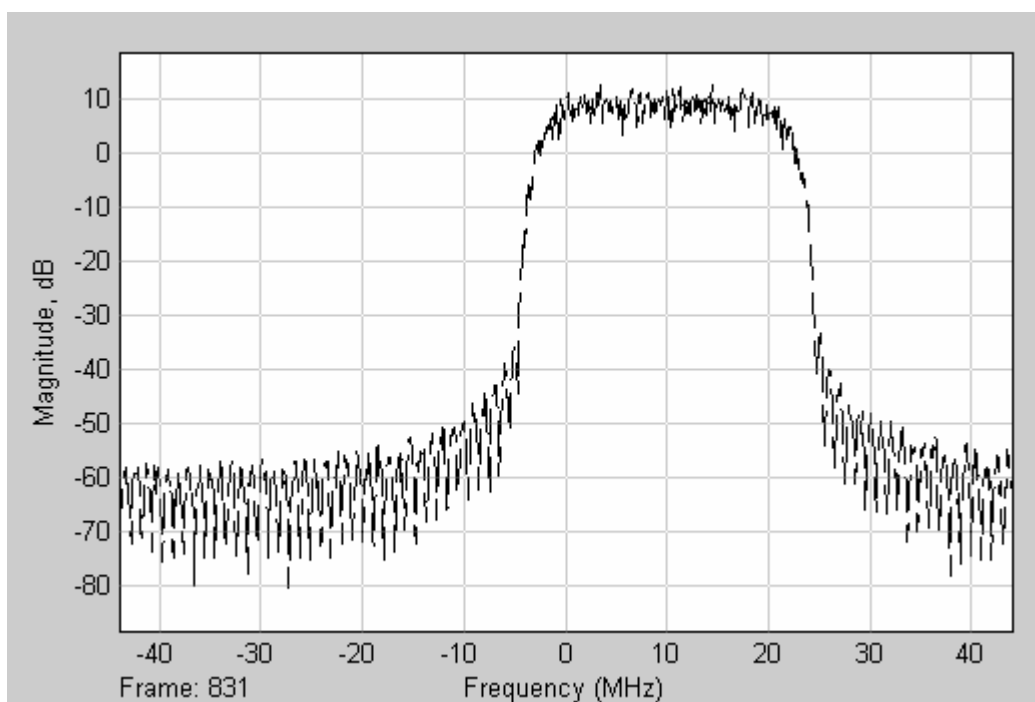
Model přijímače funguje inverzně k přijímači, tedy nejdříve se frekvence signálu přenesou zpět do základního pásma, signál je podvzorkován a zpožděn, následuje despread pomocí Barkerova kódu, a demodulace rámců PLCP a PSDU, jejichž výstupem je paket PPDU. Nakonec se odstraní preamble a hlavička PPDU, čímž se získá rámec PSDU.



obr. 5.5: Model přijímače Wi-Fi

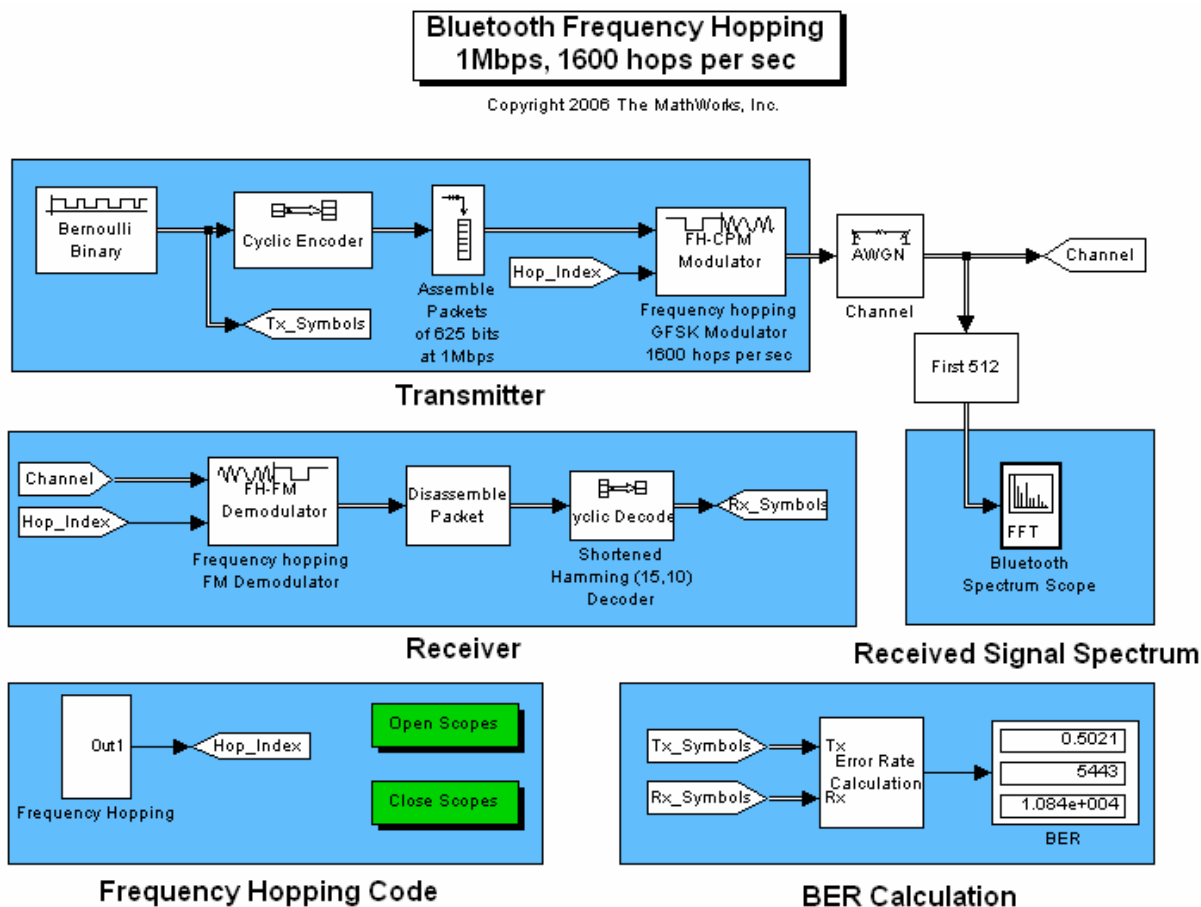
5.1.3 Výsledky simulace

Po spuštění simulace získáme závislost přenosu signálu na frekvenci (obr. 5.4). Průběh potvrzuje, že signál Wi-Fi má šířku pásma 22 MHz, nezabírá celé pásmo ISM a použití jiného kanálu by signál posunulo do jiného frekvenčního rozsahu.



obr. 5.6: Spektrum signálu Wi-Fi v základním pásmu

5.2 Popis modelu Bluetooth

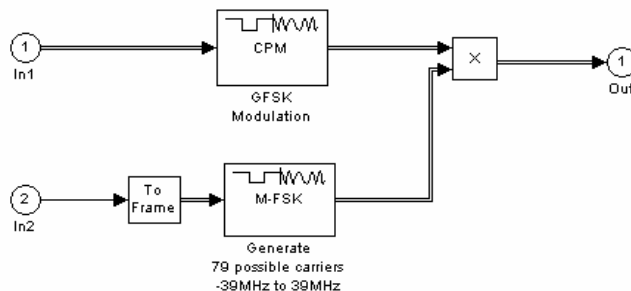


obr. 5.7: Model Bluetooth

Model na obr 5.7 obsahuje, kromě vysílače a přijímače, bloky, které umožňují sledovat frekvenční přeskoky signálu, výpočet BER a zobrazení výstupního spektra signálu.

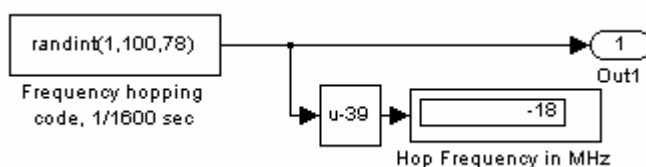
5.2.1 Vysílač

Na počátku vysílače je blok generující náhodná binární čísla, za nímž následuje blok *Cyclic Encoder*, který pomocí zkráceného Hammingova kódu (15, 10) formátuje vstupní data. Dalším blokem je *Buffer* tvořící pakety o velikosti 625 bitů, které dále posílá rychlostí 1Mb/s. Posledním blokem vysílače je *GFSK modulátor*, který zároveň násobí modulovaný vstupní signál se signálem z bloku určujícího posloupnost frekvenčního přeskakování (viz obr. 5.8).



obr. 5.8: Blok GFSK modulátoru

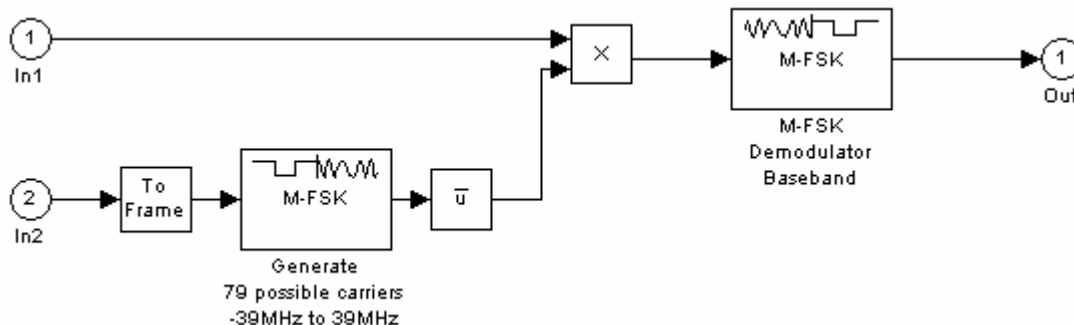
Posloupnost přeskokování je určena zvláštním blokem *Frequency Hopping*. Tento blok je základem pro řešení adaptivního frekvenčního přeskokování ve spojeném modelu Bluetooth a Wi-Fi, resp. Bluetooth, Wi-Fi a ZigBee. V základní verzi obsahuje zdroj čísel datového typu integer, která jsou generována v intervalu $< 0, 78 >$. Tento index vyjadřuje pořadové číslo přenosového kanálu Bluetooth. Blok *u-39* je čistě informativní a na přidruženém bloku *Display* umožňuje zobrazit skákání frekvence kolem středové frekvence vysílání systému Bluetooth v pásmu ISM, tj. frekvence 2441 MHz.



obr. 5.9: Blok Frequency Hopping

5.2.2 Příjímač

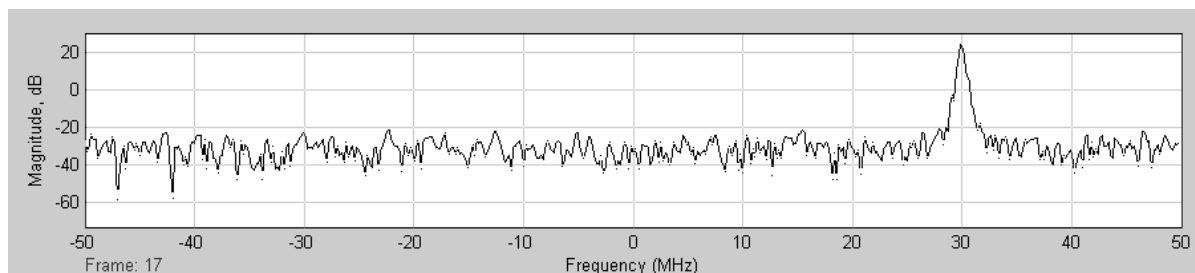
Do přijímače je přiváděn signál vysílače s přidáním bílým gausovským šumem a posloupnost frekvenčních přeskoků. V prvním bloku se vstupní signál vynásobí komplexně sdruženými hodnotami modulace M-FSK a výsledný signál se přivádí do *M-FSK demodulátoru*. V druhém bloku se paket rozloží a v bloku *cyklického dekodéru* je pomocí zkráceného Hammingova kódu (15, 10) zrekonstruován původní signál.



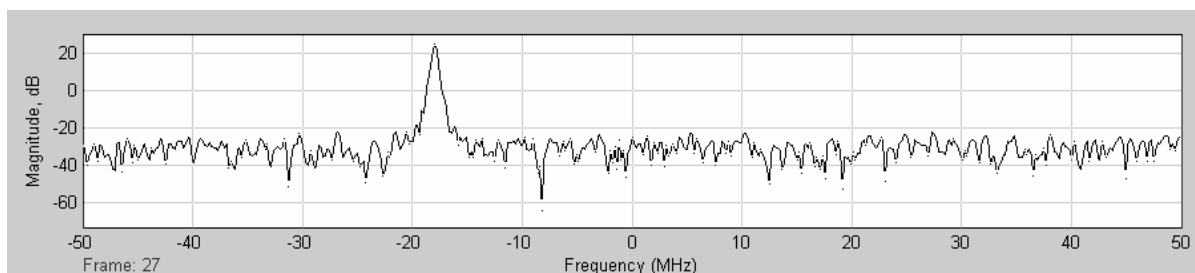
obr. 5.10: Blok Frequency hopping FM Demodulator

5.2.3 Výsledky simulace

K výstupnímu signálu vysílače se přidá aditivní bílý gausovský šum o výkonu $1\mu\text{W}$ a vybere se z něj prvních 512 vzorků, jejichž spektrum je zobrazeno na obr. 5.11. Ve výstupním spektru lze jasně rozpoznat frekvenční přeskoky v různých časových úsecích.

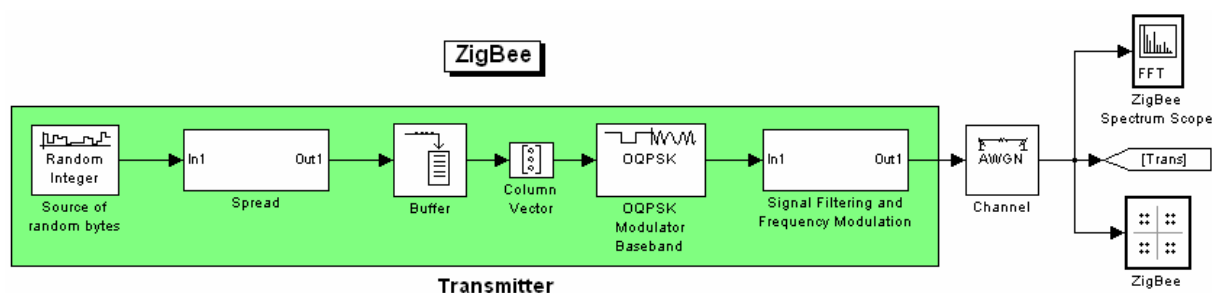


obr. 5.11a: Výstupní spektrum signálu Bluetooth pro náhodný frekvenční přeskok



obr. 5.11b: Výstupní spektrum signálu Bluetooth pro náhodný frekvenční přeskok

5.3 Popis modelu ZigBee

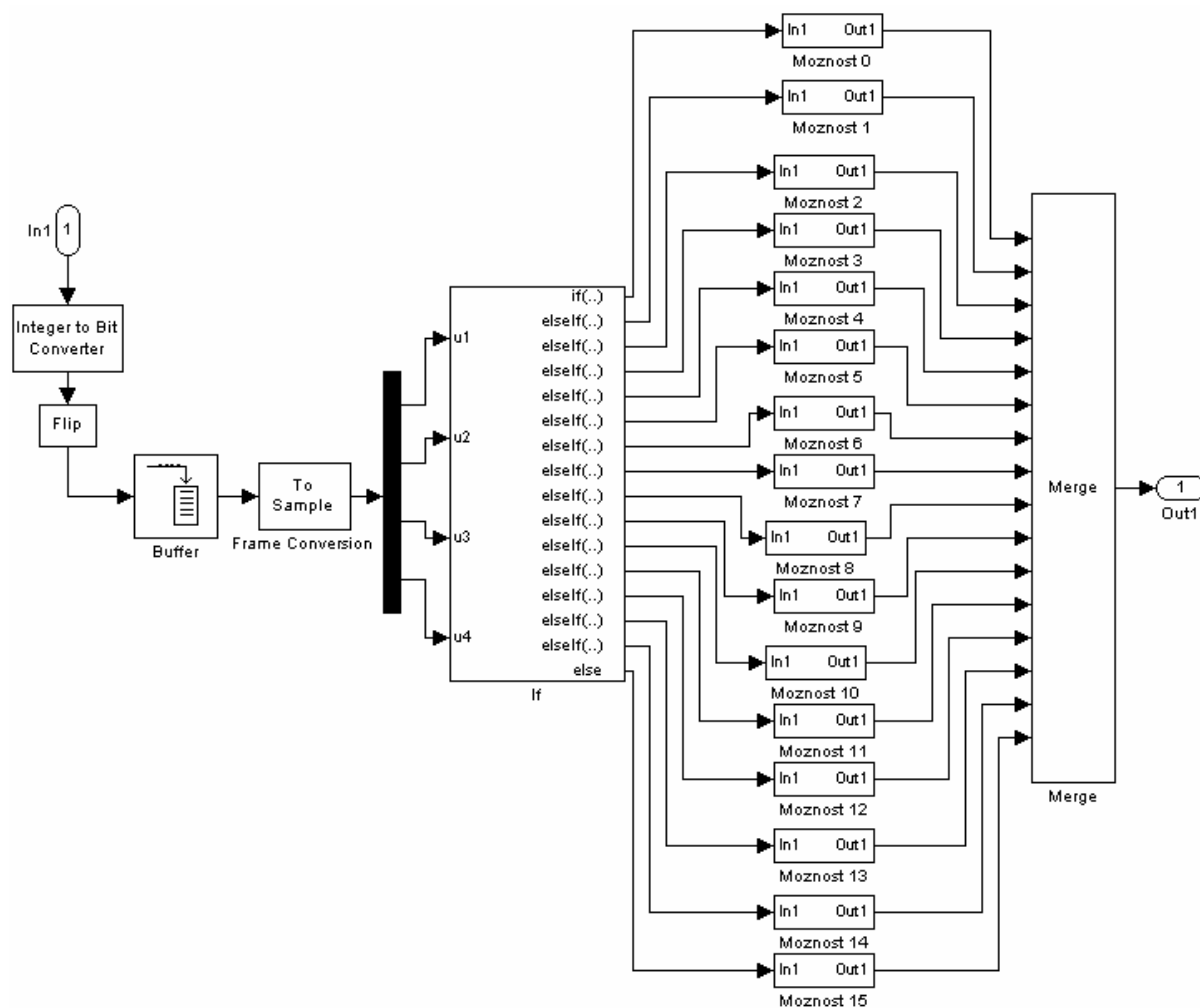


obr. 5.12: Model ZigBee

Model ZigBee obsahuje blok vysílače, přenosový kanál přidávající aditivní bílý gausovský šum a spektrální zobrazovací jednotku.

5.3.1 Vysílač

Na počátku vysílače je zdroj náhodných čísel datového typu integer, která generuje v rozsahu $< 0, 15 >$ rychlostí 62500 vzorků za vteřinu. Tyto vzorky jsou v rámcích o velikosti 128 bytů vedeny do bloku *Spread*, kde jsou dále formátovány.



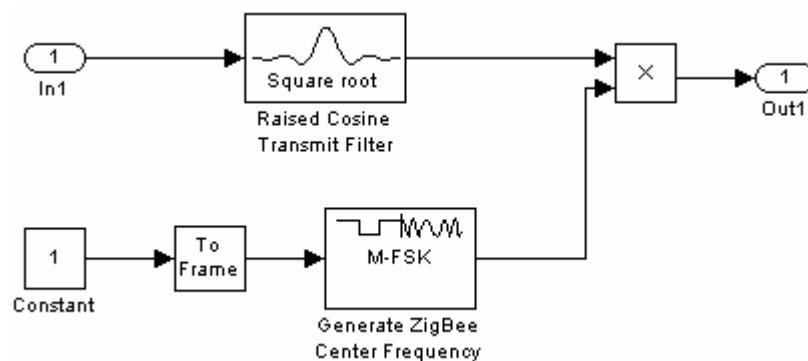
obr. 5.13: Blok Spread

Jednotlivá čísla integer jsou v bloku *Spread* nejdříve převedena do bitové podoby. Tímto v rámci vzniká 512 bitů s bitovou periodou $T_b = 4\mu s$. Bitová posloupnost je dále otočena, takže nejvýznamnější bity každé čtveřice bitů jsou vysílány jako poslední. Bloky *Buffer* a *Frame Conversion* zajišťují, aby se na vstup bloku *If* dostala vždy čtveřice bitů v rámci. V tomto bloku dochází k porovnání vstupní čtveřice bitů s předem zadanými kombinacemi. Poté, co systém vyhodnotí, které bitové slovo je na vstupu bloku, spustí odpovídající blok *Moznost*, který na výstup pošle předem danou pseudonáhodnou sekvenci chipů rychlostí 2 Mchip/s. Sekvence jsou určeny standardem IEEE 802.15.4.

Data symbol (decimal)	Data symbol (binary) (b ₀ b ₁ b ₂ b ₃)	Chip values (c ₀ c ₁ ... c ₃₀ c ₃₁)
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	1000	11101101100111000011010100100010
2	0100	00101110110110011100001101010010
3	1100	00100010111011011001110000110101
4	0010	01010010001011101101100111000011
5	1010	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	1110	10011100001101010010001011101101
8	0001	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	0101	01111011100011001001011000000111
11	1101	01110111101110001100100101100000
12	0011	00000111011110111000110010010110
13	1011	01100000011101111011100011001001
14	0111	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

obr. 5.14: Tabulka sekvencí chipů pro rozprostírání signálu ZigBee [7]

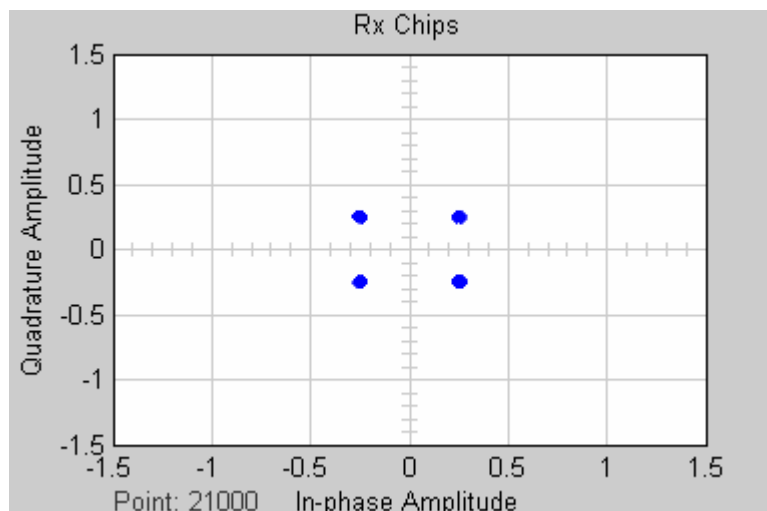
Chipy jsou v bloku *Buffer* opět převedeny do rámců o velikosti $128 \cdot 32 = 4096$ chipů a ve tvaru sloupcového vektoru jsou posílány do modulátoru O-QPSK. Signál se vytváří a posune na žádanou frekvenci v bloku *Signal Filtering and Frequency Modulation*. Signál je v tomto bloku upraven ve filtru RRC a následně modulován M-FSK modulátorem.



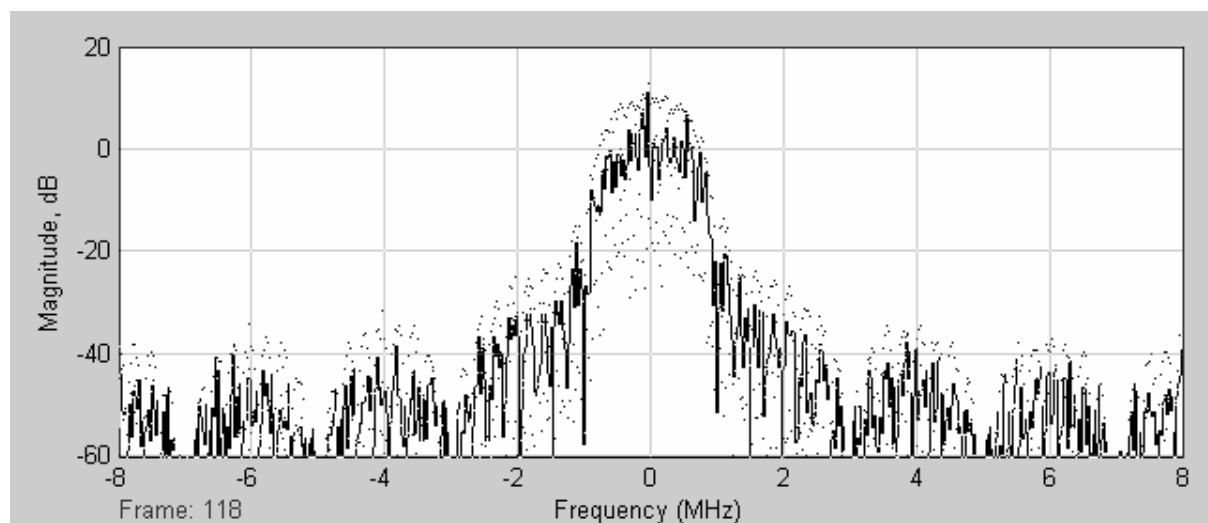
obr. 5.15: Blok Signal Filtering and Frequency Modulation

5.3.2 Výsledky simulace

K signálu je poté přidán aditivní bílý gaušovský šum o výkonu $1\mu\text{W}$. Obrázek 5.16 potvrzuje skutečnost, že po modulaci nabývá signál čtyř stavů a spektrum na obr. 5.17 zobrazuje, že šířka pásma vysílaného signálu ZigBee je 2 MHz:



obr. 5.16: I-Q diagram po modulaci O-QPSK a tvarování signálu

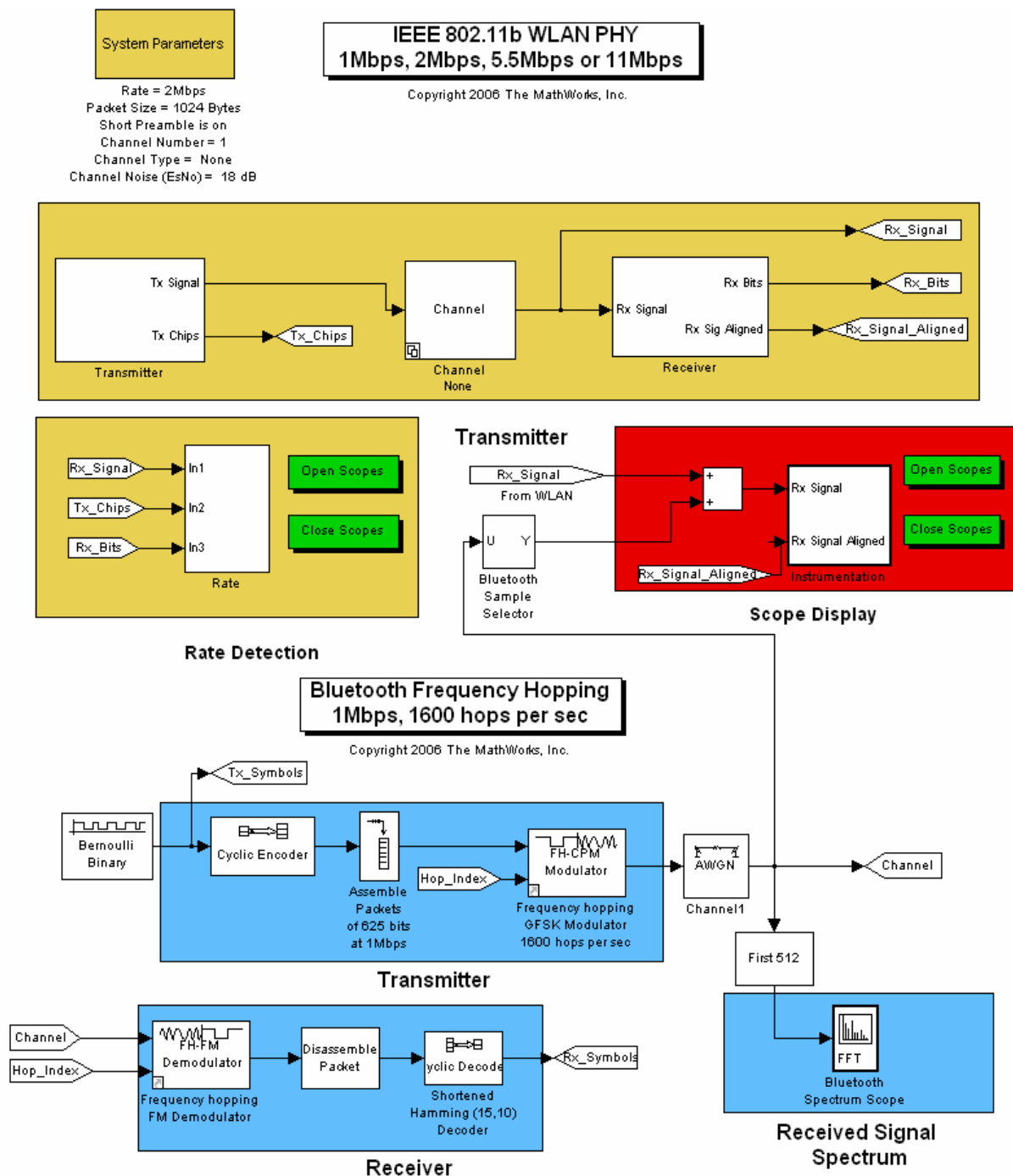


obr. 5.17: Spektrum vysílaného signálu ZigBee

5.4 Propojení modelů

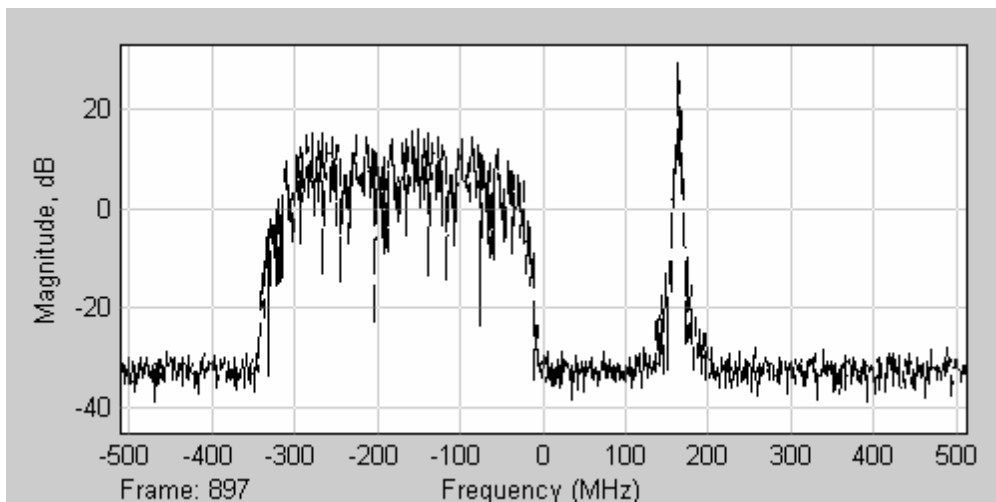
5.4.1 Wi-Fi a Bluetooth

Propojení jednotlivých modelů bylo realizováno pomocí součtu signálů Wi-Fi a signálu z bloku *Selector*, který ze signálu Bluetooth vybírá stejný počet vzorků, jaký pro danou rychlost (2 / 5.5 / 11 Mbps) používá k zobrazení výstupu Wi-Fi (obr. 5.17). Spojený model nepodporuje rychlost Wi-Fi 1 Mbps kvůli příliš vysokému počtu vzorků.

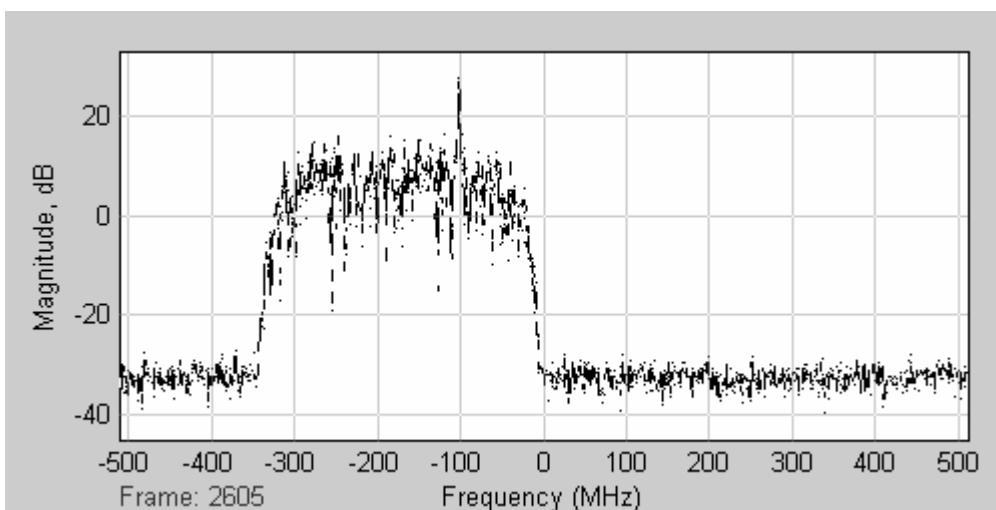


obr. 5.18: Vizualizace propojení modelů systémů Wi-Fi a Bluetooth

Na obr. 5.19a,b můžeme vidět spojený signál obou systémů. Vzhledem k faktu, že šířka pásma kanálu Wi-Fi je 22 MHz je vysoká pravděpodobnost přeskočení nosné frekvence Bluetooth na frekvenci, kterou zaujímá Wi-Fi. Tento problém koexistence bude řešen pomocí adaptivního frekvenčního skákání, viz kap. 5.5.1.



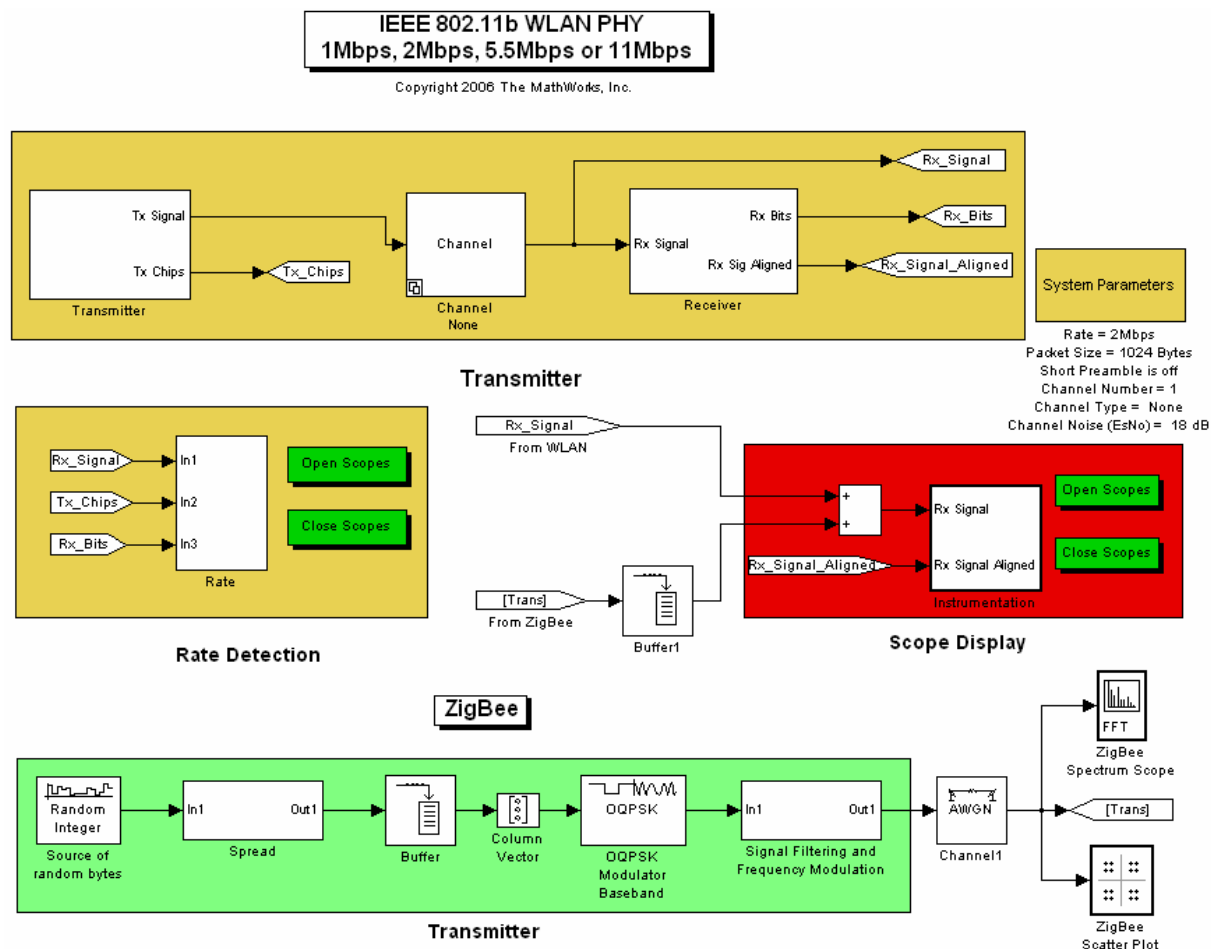
obr. 5.19a: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a Bluetooth – bez interference



obr. 5.19b: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a Bluetooth – s interferencí

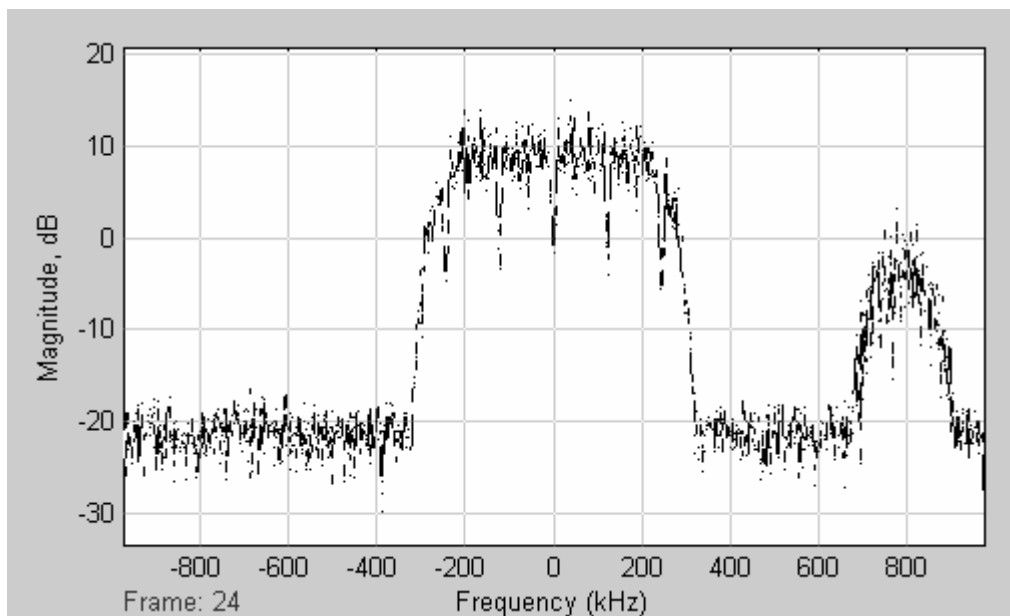
5.4.2 Wi-Fi a ZigBee

Modely Wi-Fi a ZigBee byly propojeny součtovým blokem, do kterého přichází signál Wi-Fi v nezměněné podobě. Počet vzorků v jednom rámci signálu ZigBee je upraven v bloku *Buffer1*, aby odpovídal počtu vzorků v rámci signálu Wi-Fi.

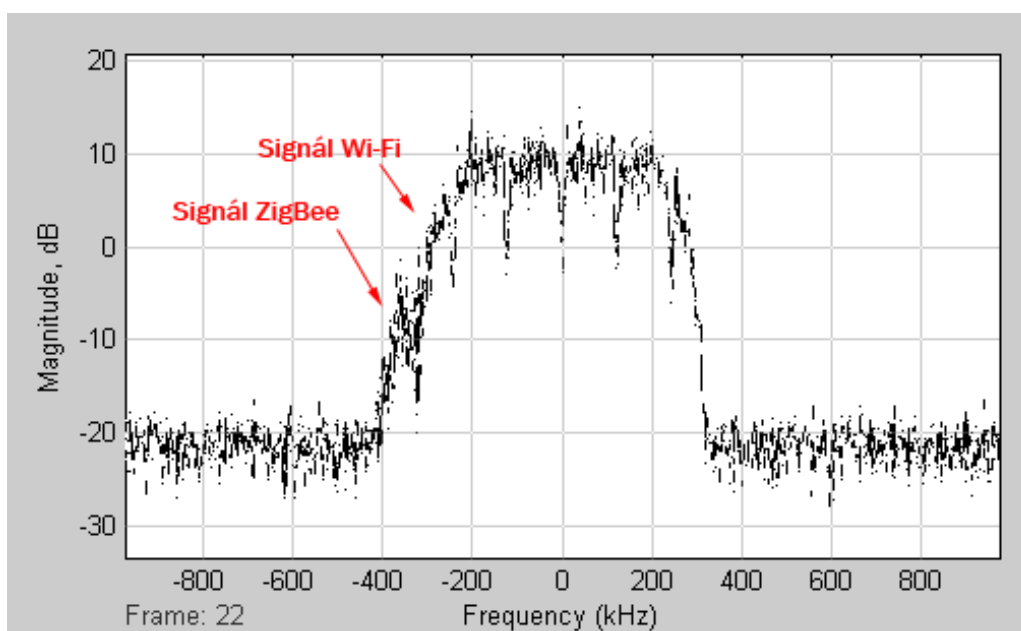


obr. 5.20: Vizualizace propojení modelů systémů Wi-Fi a ZigBee

Signály v tomto modelu mohou vzájemně interferovat kvůli manuální volbě vysílacích kanálů. Koexistenční řešení systémů Wi-Fi a ZigBee uplatní automatickou volbu kanálu ZigBee v závislosti na manuální volbě kanálu Wi-Fi. Viz kap. 5.5.2.



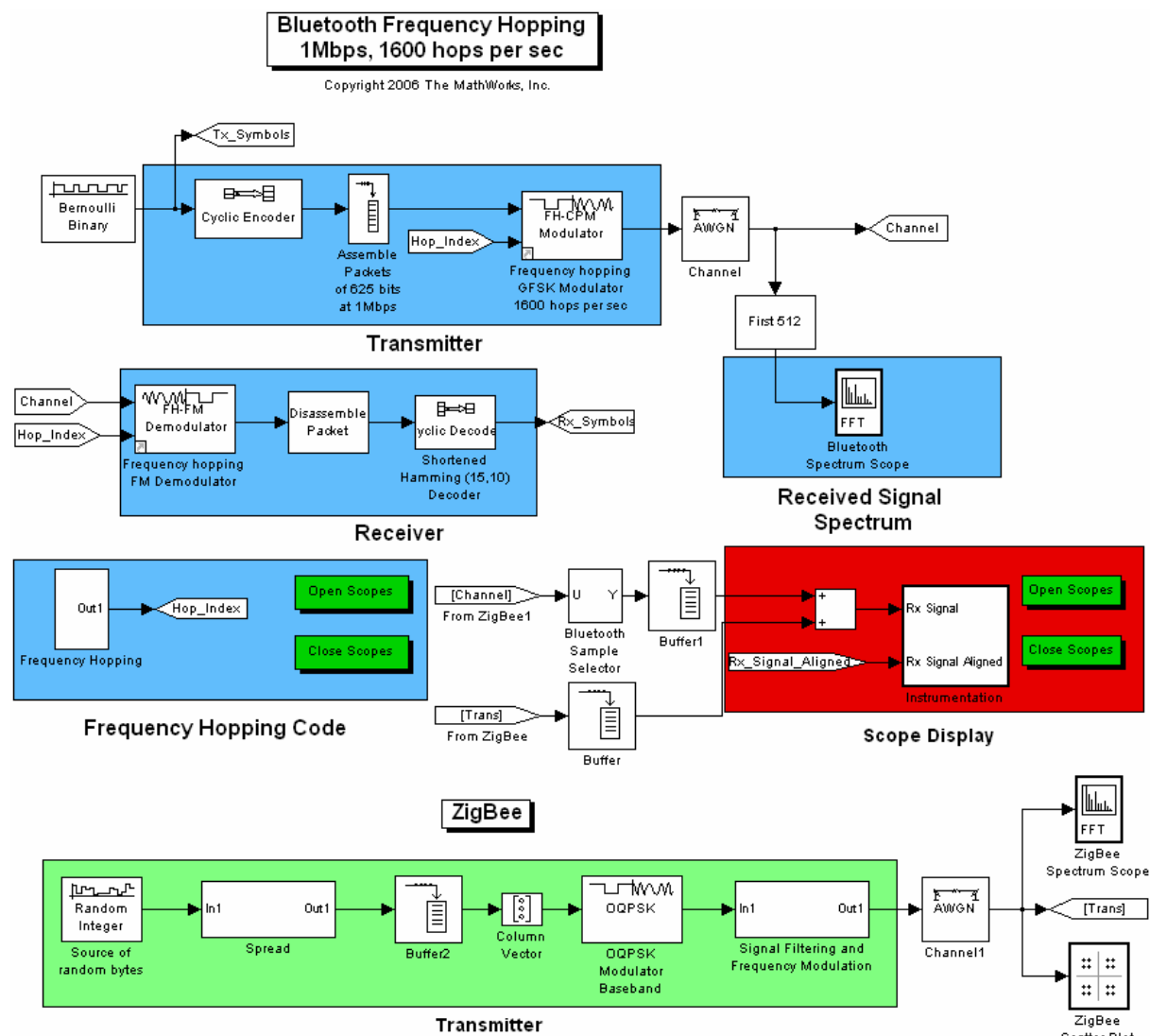
obr. 5.21a: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a ZigBee – bez interference



obr. 5.21b: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a ZigBee – s interferencí

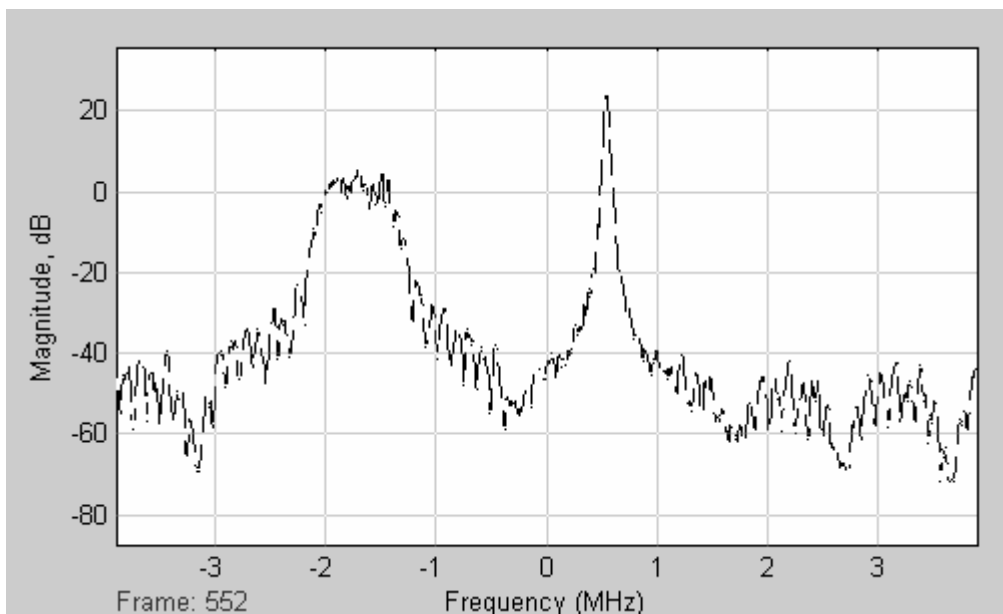
5.4.3 Bluetooth a ZigBee

Pro spojení signálů Bluetooth a ZigBee byl použit součtový blok, do kterého přichází signál ZigBee v nezměněném počtu vzorků na rámec (32 768) a signál Bluetooth z něhož je vybrán stejný počet vzorků.

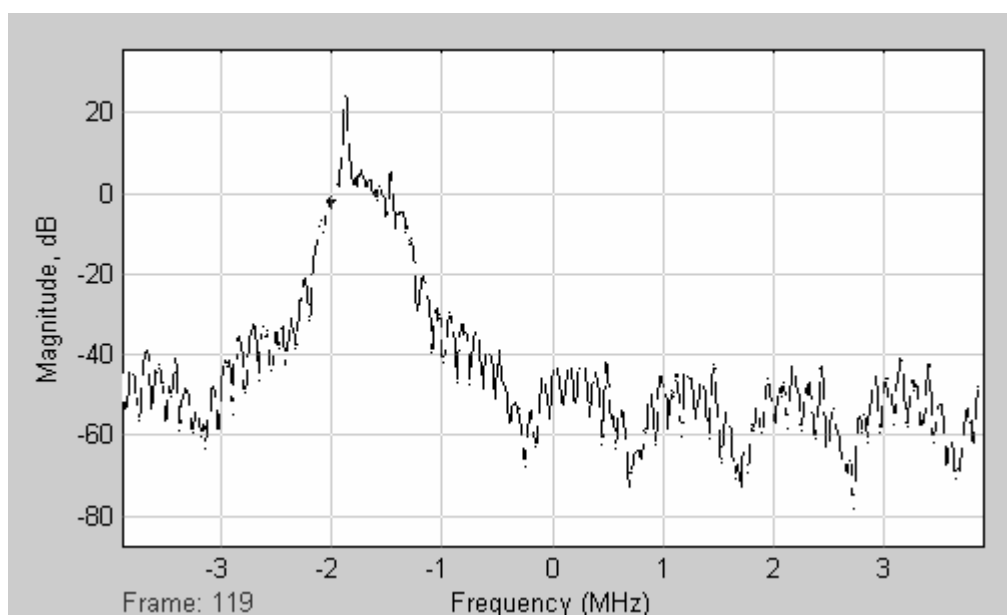


obr. 5.22: Vizualizace propojení modelů systémů Bluetooth a ZigBee

Kvůli rychlému frekvenčnímu přeskokování systému Bluetooth je zde stále velká pravděpodobnost interference, i když není tak vysoká, jako u kombinace s Wi-Fi. Koexistence bude řešena podobně jako u kombinace systémů Wi-Fi a Bluetooth, tedy adaptivním frekvenčním přeskokováním. Viz kap. 5.5.3.



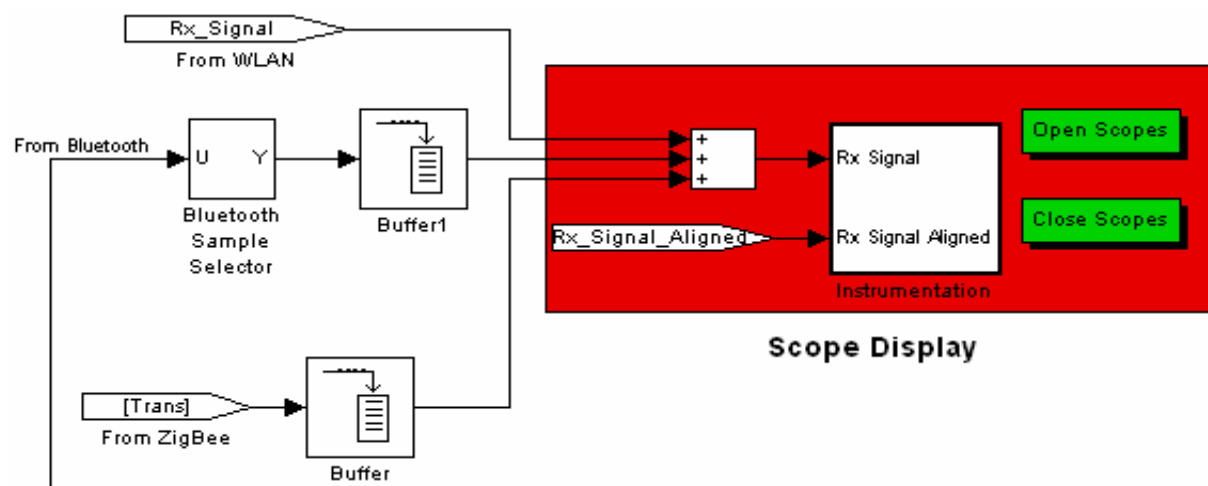
obr. 5.23a: Výsledný signál spojeného signálu Bluetooth a ZigBee – bez interference



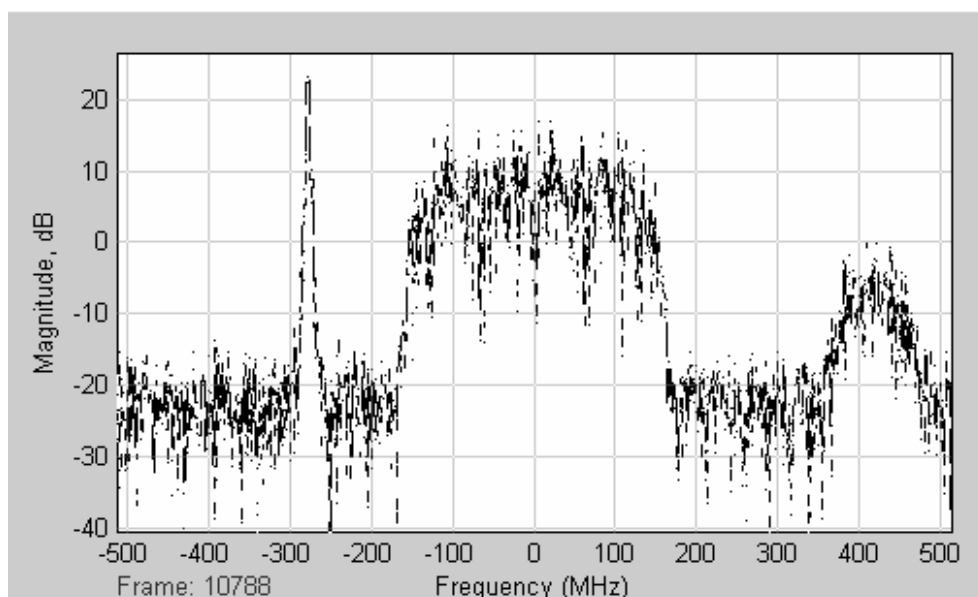
obr. 5.23b: Výsledný signál spojeného signálu Bluetooth a ZigBee – s interferencí

5.4.4 Spojený model Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee

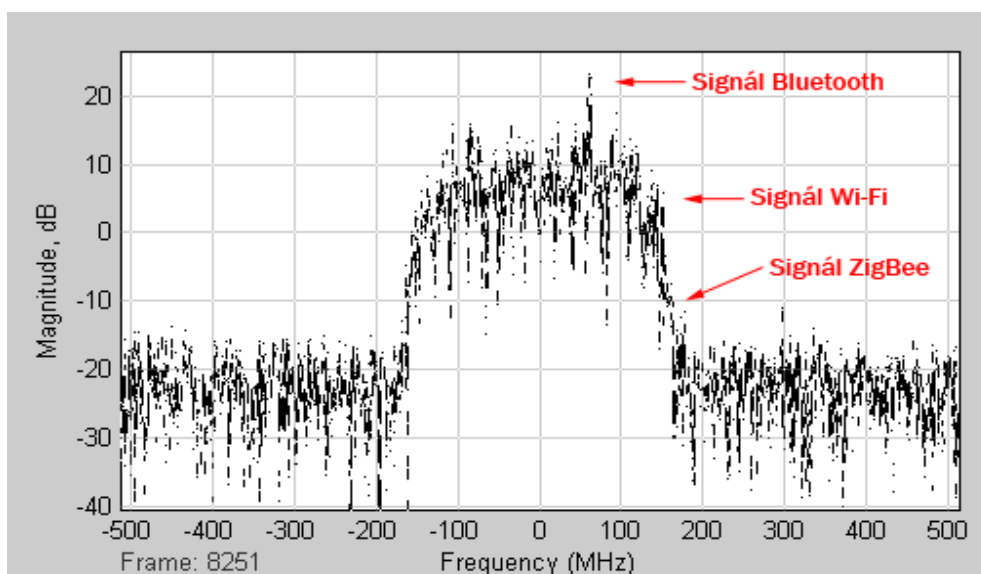
Spojený model všech tří systémů byl realizován na stejném principu jako dílčí modely – součtu jednotlivých signálů. Z každého signálu byl vybrán počet vzorků, aby souhlasil s počtem vzorků Wi-Fi daným nastavenými parametry. Blok *Buffer* je ve větvi Bluetooth zařazen pro urychlení simulace. Popis konečného koexistenčního řešení viz kap. 5.5.4.



obr. 5.24: Realizace součtu signálů ve spojeném modelu tří bezdrátových systémů



obr. 5.25a: Výsledný signál spojeného signálu – bez interference

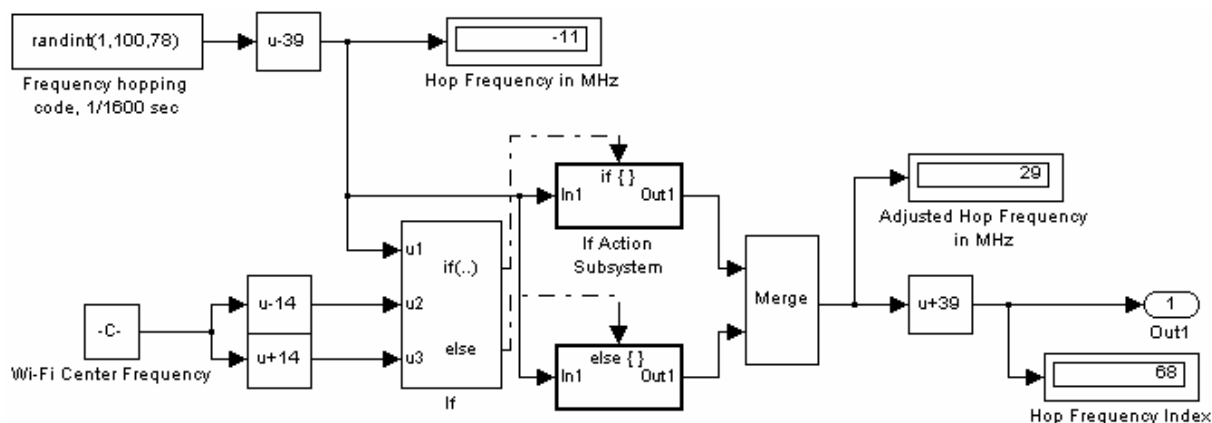


obr. 5.25b: Výsledný signál spojeného signálu – s interferencí

5.5 Návrh koexistenčního řešení

5.5.1 Wi-Fi a Bluetooth

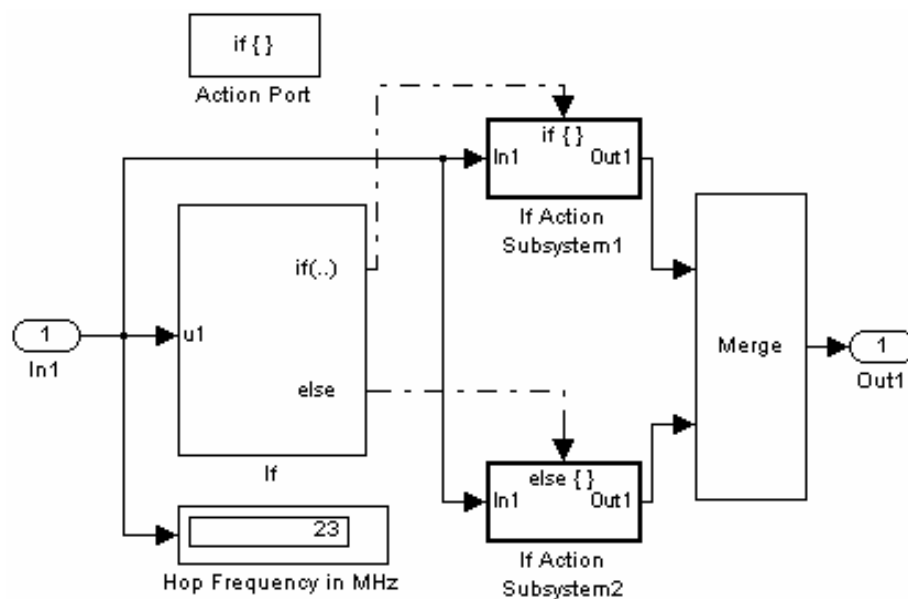
V tomto řešení je použit mechanismus AFH, který je ale v tomto případě kolaborativní. Je zde upravena přeskakovací sekvence systému Bluetooth tak, aby vysílací kanál Bluetooth nebyl na frekvenci, kterou zabírá Wi-Fi. Toho bylo dosaženo tak, že v bloku *Frequency Hopping* (viz obr. 5.18) je načtena střední frekvence kanálu využívaného systémem Wi-Fi. Ke střední frekvenci je přičteno i odečteno 14 MHz (bloky $u+14$ a $u-14$).



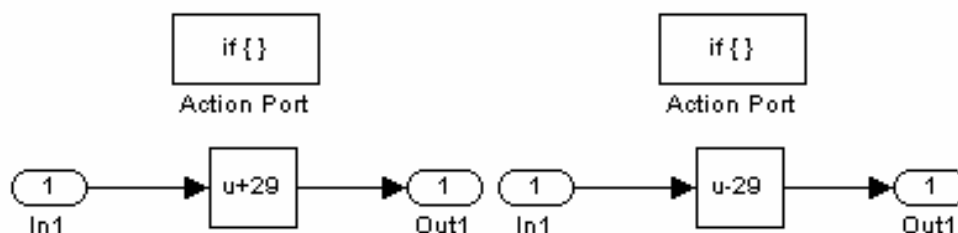
obr. 5.26: Řešení koexistence Wi-Fi a Bluetooth mechanismem typu AFH

Blok *If* zjišťuje, zda je frekvence zvolená přeskakováním Bluetooth v intervalu frekvencí využívaných Wi-Fi (kvůli možnému rušení na okrajích pásma Wi-Fi je započítaná šířka pásma 28 MHz místo 22 MHz). Pokud v tomto intervalu není nalezeno vysílání, index kanálu Bluetooth se pošle na výstup nezměněn. V případě, že by se signál Bluetooth nalézal v pásmu Wi-Fi, je k indexu přičteno, resp. odečteno 29 MHz.

Při interferenci zjišťuje blok *If Action Subsystem*, zda je index frekvence pod nebo nad frekvencí středního kanálu pásma Bluetooth. Model je upraven tak, aby střední frekvence byla označena 0. Pokud je tedy interference v kladné polovině spektra, od indexu skoku se odečte 29, naopak když ke kolizi dojde v záporné polovině spektra, k indexu skoku se přičte 29. Tímto je zaručeno, že při dalším přeskoku nosné Bluetooth nedojde k interferenci se signálem Wi-Fi.



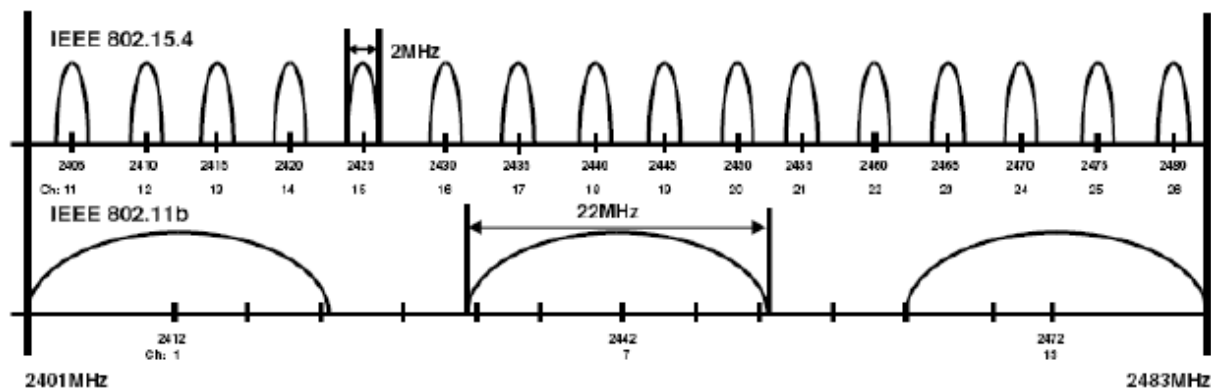
obr. 5.27: Blok If Action Subsystem rozhodující o přičtení, resp. odečtení frekvence při interferenci kanálů Wi-Fi a Bluetooth



obr. 5.28: Bloky If Action Subsystem 1 a 2, které přičítají, resp. odečítají frekvenci

5.5.2 Wi-Fi a ZigBee

Nejčastějším a nejjednodušším řešením koexistence systémů Wi-Fi a ZigBee využívá toho, že nejvyužívanějšími kanály Wi-Fi jsou nepřekrývající se kanály 1, 7 a 13. I kdyby Wi-Fi vysílal na všech těchto kanálech současně, je mezi nimi prostor pro 4 kanály ZigBee, konkrétně kanály 15, 16, 21 a 22.



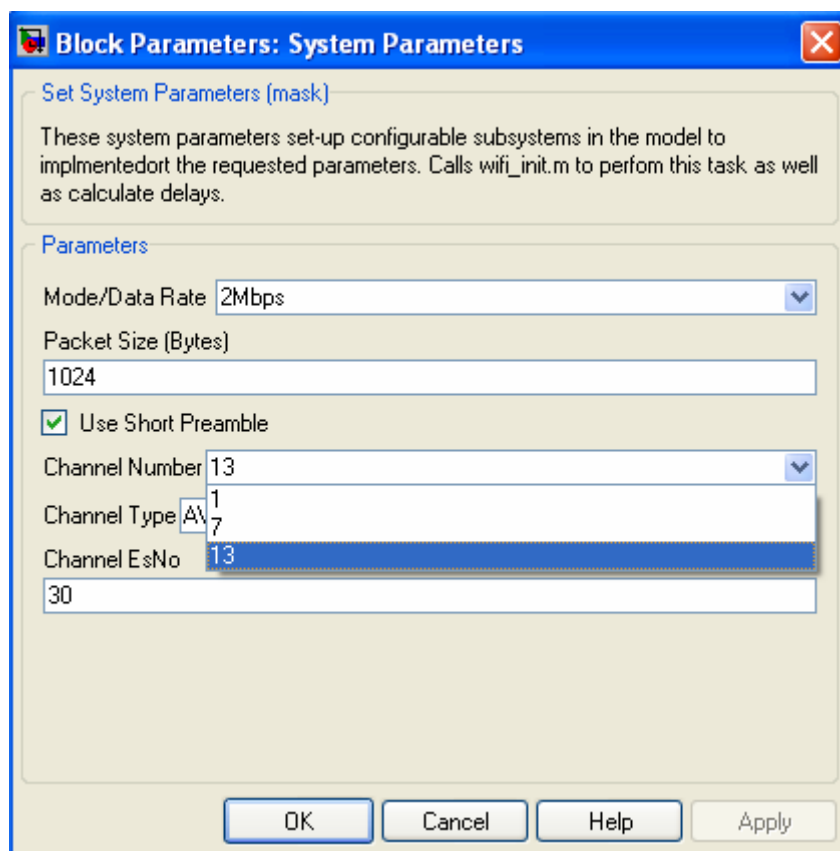
obr. 5.29: Srovnání přenosových kanálů Wi-Fi a ZigBee v pásmu ISM [15]

Pro účely této práce byl pro každý kanál Wi-Fi vybrán jeden kanál ZigBee, jehož nosná byla od nosné Wi-Fi nejvíce vzdálena podle tabulky:

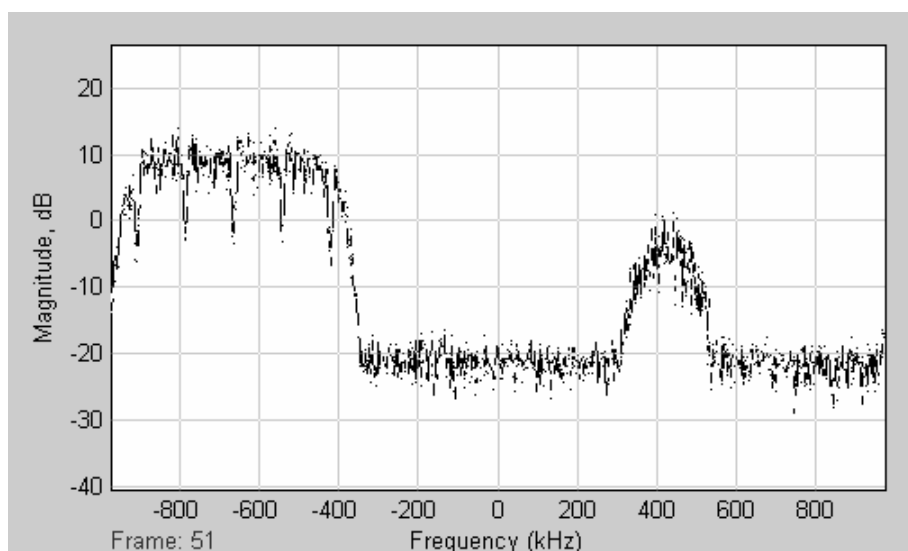
Frequency Offsets		IEEE 802.11b/g		
		Channel 1 2412 MHz	Channel 7 2442 MHz	Channel 13 2472 MHz
IEEE 802.15.4	Channel 15 2425 MHz	13 MHz	17 MHz	47 MHz
	Channel 16 2430 MHz	18 MHz	12 MHz	42 MHz
	Channel 21 2455 MHz	43 MHz	13 MHz	17 MHz
	Channel 22 2460 MHz	48 MHz	18 MHz	12 MHz

obr. 5.30: Tabulka frekvenčních rozdílů nosných systémů Wi-Fi a ZigBee pro určené kanály [15]

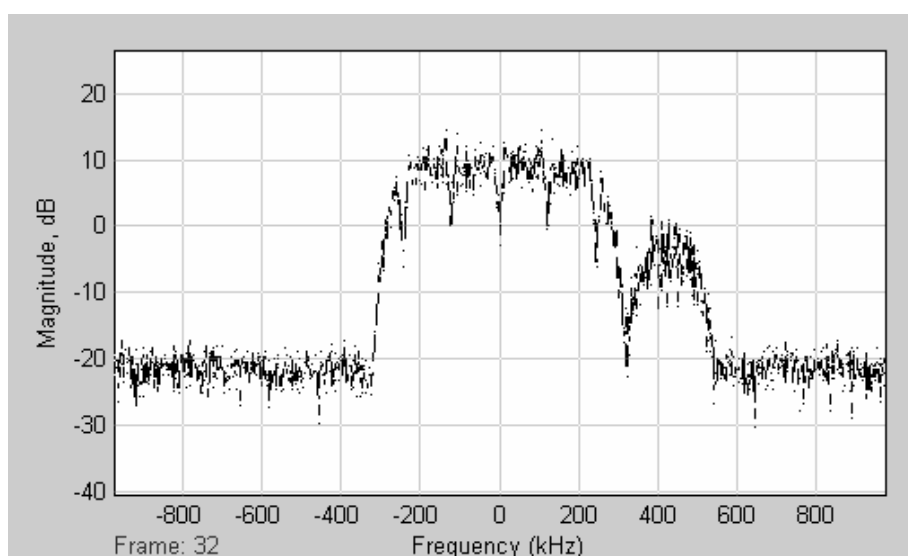
Pro Wi-Fi kanál 1 a 7 byl tedy vybrán kanál ZigBee 22 a pro kanál Wi-Fi 13 byl vybrán kanál ZigBee 15. Ostatní kanály WLAN byly v nastavení parametrů Wi-Fi znepřístupněny a M-FSK modulátoru ZigBee (viz obr. 5.15) jsou automaticky přiřazovány hodnoty nosných v závislosti na zvoleném kanálu Wi-Fi v nastavení parametrů.



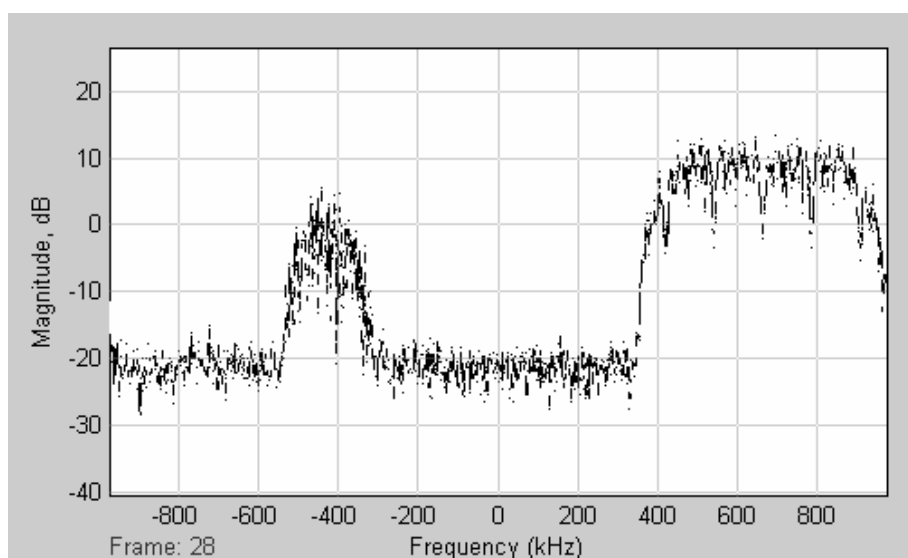
obr. 5.31: Upravený výběr vysílacího kanálu Wi-Fi



obr. 5.32a: Výsledné spektrum při výběru kanálu Wi-Fi 1



obr. 5.32b: Výsledné spektrum při výběru kanálu Wi-Fi 7

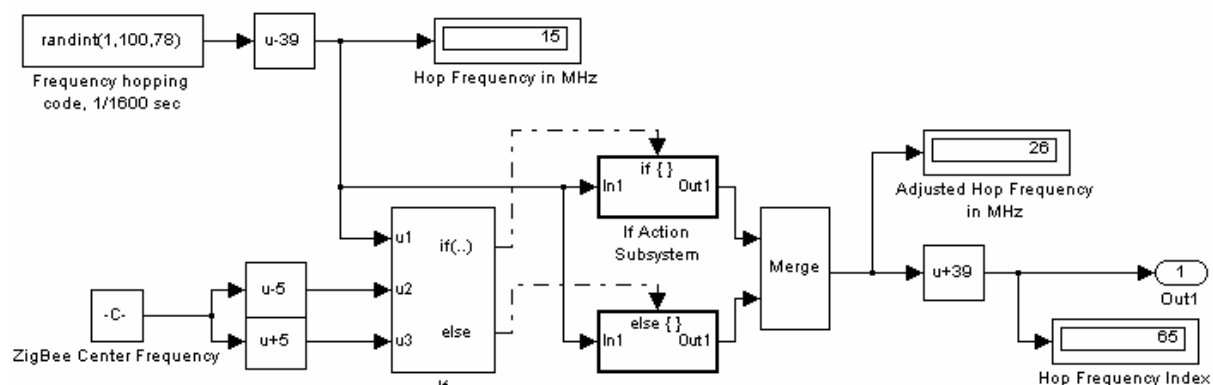


obr. 5.32c: Výsledné spektrum při výběru kanálu Wi-Fi 13

5.5.3 Bluetooth a ZigBee

Pro současné vysílání systémů Bluetooth a ZigBee bylo vytvořeno koexistenční řešení, které stejně jako u kombinace Bluetooth s Wi-Fi používá adaptivní frekvenční přeskokování nosné Bluetooth. V tomto případě se v bloku *Frequency Hopping* (viz obr. 5.22) načítá nosná frekvence zvoleného kanálu ZigBee, ke které je přičteno, resp. odečteno 5 MHz. Blok *If* zjišťuje, zda nosná systému Bluetooth nemá jako další skok přidělenou frekvenci v tomto intervalu. Pokud přidělená nosná nekoliduje s ZigBee, pokračuje nezměněna, naopak pokud by došlo k interferenci, bylo by k indexu nosné přičteno, resp. odečteno 11.

Blok *If Action Subsystem* pracuje na stejném principu, jako u Wi-Fi s Bluetooth (viz kap. 5.5.1 a obr. 5.27), v tomto případě se ale k indexu přičítá a odečítá výše zmíněná hodnota 11.

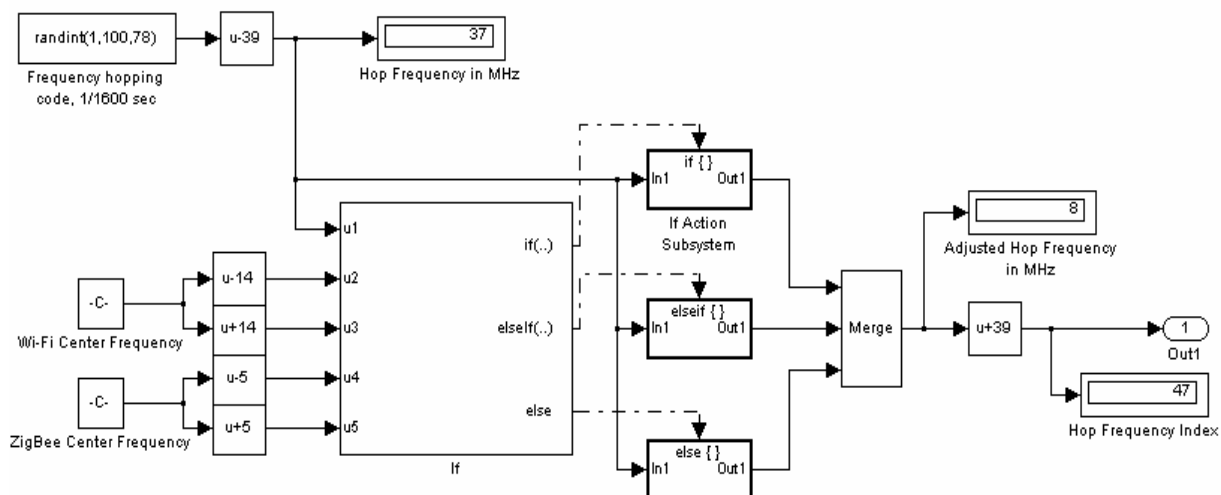


obr. 5.33: Řešení koexistence Bluetooth a ZigBee mechanismem typu AFH

5.5.4 Koexistenční řešení systémů Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee

Konečné řešení modelu koexistence zahrnuje kombinaci všech tří dílčích východisek problému vzájemného rušení. Nastavení bloku *System Parameters* (viz obr. 5.1) je stejné, jako v případě koexistence Wi-Fi a ZigBee - manuálním výběrem kanálů WLAN (1 / 7 / 13) se automaticky přiřadí nosná systémů ZigBee.

V bloku *Frequency Hopping* (viz obr. 5.34) se pak načtou nosné obou těchto signálů a blok *If* zjišťuje, zda další frekvenční přeskok pro nosnou Bluetooth nekoliduje s intervalem kmitočtů určeným pro ochranu signálů Wi-Fi a ZigBee před interferencí. Pokud by určená frekvence nebyla sdílená s žádným ze systémů, zůstane index nezměněn, zatímco v případě, kdy by došlo k vzájemnému rušení, bude index upraven.

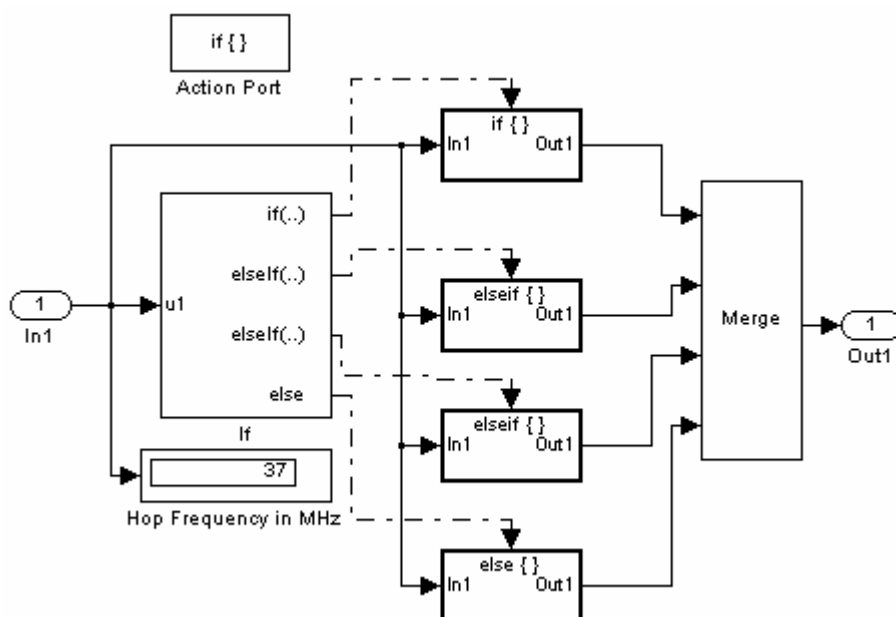


obr. 5.34: Blok Frequency Hopping

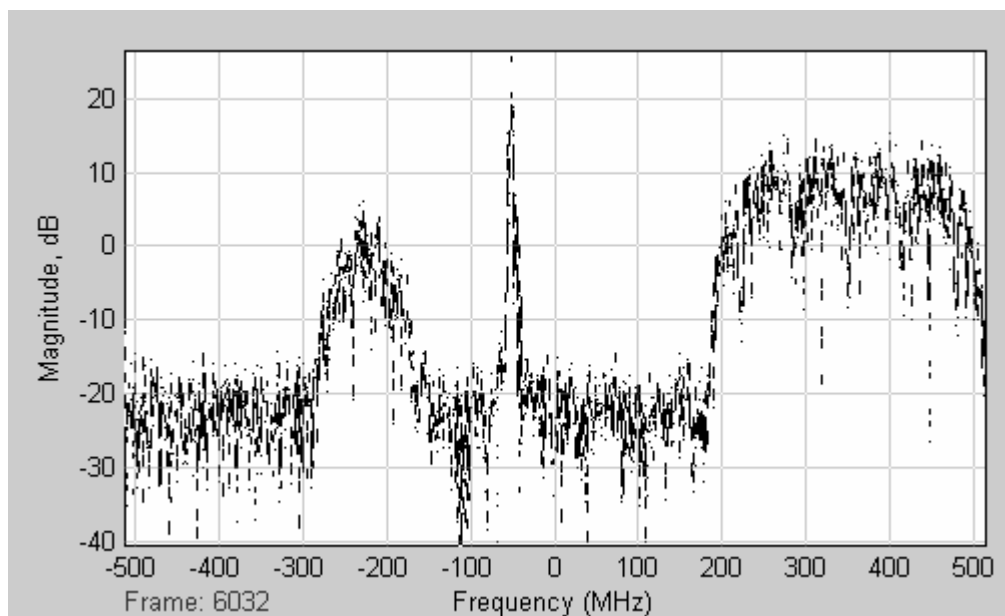
Pokud by signál Bluetooth sdílel frekvenci se signálem ZigBee, byl by posunut na frekvenci o 11 MHz vyšší. Při interferenci se signálem Wi-Fi se v bloku *If Action Subsystem* dále určuje interval, do kterého index spadá:

- Pokud se nachází v intervalu $< -39, -15 >$, zvýší se index o 29.
- V intervalu $< -14, -2 >$ se zvýší o 40.
- V intervalech $< -1, 8 >$ a $< 20, 39 >$ se sníží o 29.
- V intervalu $< 9, 19 >$ se sníží o 40.

Těmito úpravami je zaručeno, že nosná Bluetooth neskočí na frekvenci používanou Wi-Fi ani ZigBee a to při použití jakéhokoliv ze tří určených kanálů Wi-Fi (tedy i dvou určených kanálů ZigBee).



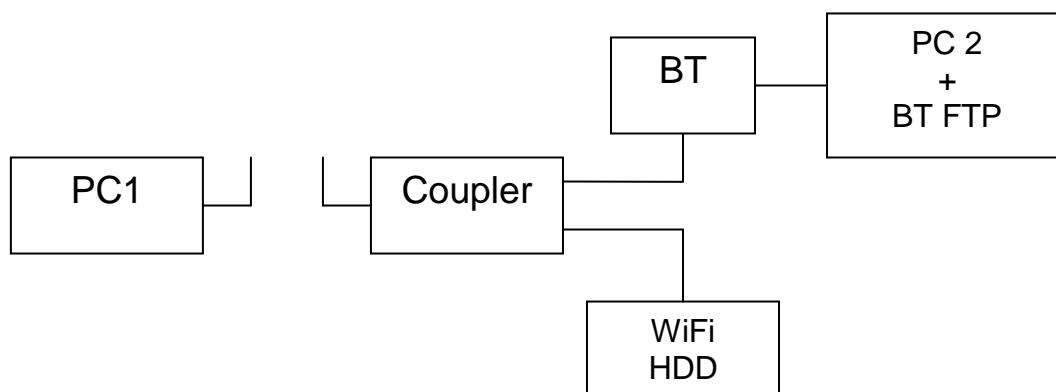
obr. 5.35: Blok If Action Subsystem



obr. 5.36: Výsledné spektrum spojeného modelu

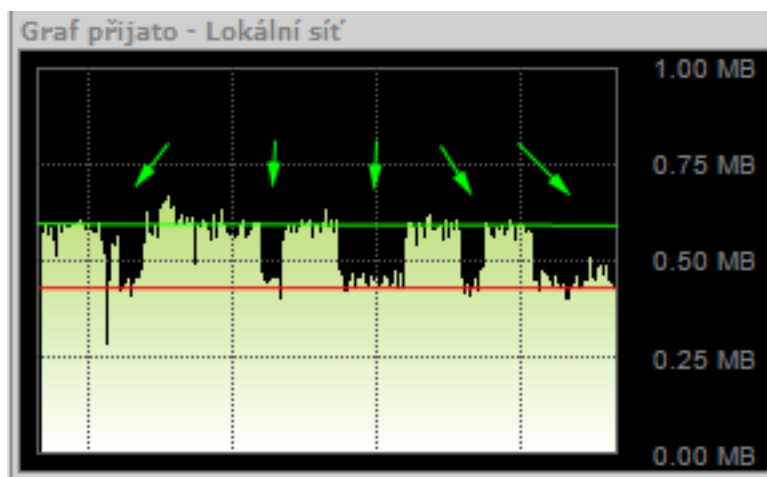
6 Laboratorní měření

Pro změření přenosových rychlostí signálů Bluetooth a Wi-Fi byla sestavena soustava podle obr. 6.1. Z PC1 bylo vytvořeno Wi-Fi připojení na bezdrátový harddisk a zároveň na FTP server komunikující přes modul Bluetooth připojený do USB PC2.



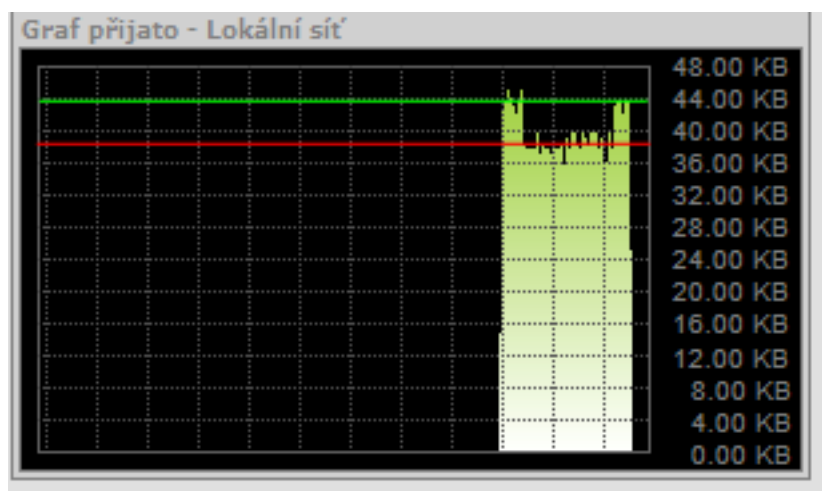
obr. 6.1: Schéma zapojení měřicí soustavy

Při vysílání obou systémů zároveň bylo patrné vzájemné rušení. Na obr. 6.2 jsou zelenými šipkami vyznačené momenty, kdy se k vysílání Wi-Fi přidalo i vysílání Bluetooth. Zelená linka indikuje úroveň rychlosti přenosu Wi-Fi při samostatném vysílání, červená linka při vysílání obou systémů současně.



obr. 6.2: Rušení signálu Wi-Fi signálem Bluetooth

Rušení platí i při opačné situaci, kdy se k vysílání Bluetooth přidá vysílání Wi-Fi, jak dokazuje obr. 6.3.



obr. 6.3: Rušení signálu Bluetooth signálem Wi-Fi

Přesné hodnoty přenosových rychlostí naměřené při samostatném i současném vysílání obou systémů jsou vypsány v tabulkách 6.1 a 6.2.

Tab. 6.1: Hodnoty přenosové rychlosti pro výkon WiFi HD 84mW

Měření č.	Samostatně vysílající [kB/s]		Současné vysílání [kB/s]		Rozdíl [kB/s]		Součet [kB/s]	
	BT	Wi-Fi	BT	Wi-Fi	BT	Wi-Fi	Samostatně	Současně
1	43,9	594,7	33,2	444,3	10,7	150,4	638,6	477,5
2	43,0	605,5	33,2	449,2	9,8	156,3	648,5	482,4
3	43,9	617,2	33,2	460,0	10,7	157,2	661,1	493,2
4	38,1	607,4	34,2	455,1	3,9	152,3	645,5	489,3
5	43,0	598,6	34,2	467,8	8,8	130,8	641,6	502,0
6	45,9	585,9	30,3	450,2	15,6	135,7	631,8	480,5
7	43,0	596,7	32,2	457,0	10,8	139,7	639,7	489,2
8	41,0	596,7	34,2	439,5	6,8	157,2	637,7	473,7
9	41,0	601,6	35,2	455,1	5,8	146,5	642,6	490,3
10	43,0	603,5	34,2	435,5	8,8	168,0	646,5	469,7
Ø	42,6	600,8	33,4	451,4	9,2	149,4	643,4	484,8
Max	45,9	617,2	35,2	467,8	15,6	168,0	661,1	502,0

Tab. 6.2: Hodnoty přenosové rychlosti pro výkon WiFi HD 13mW

Měření č.	Samostatně vysílající [kB/s]		Současné vysílání [kB/s]		Rozdíl [kB/s]		Součet [kB/s]	
	BT	Wi-Fi	BT	Wi-Fi	BT	Wi-Fi	Samostatně	Současně
1	43,9	610,0	38,1	432,6	5,8	177,4	653,9	470,7
2	50,8	601,6	38,9	455,1	11,9	146,5	652,4	494,0
3	43,9	603,5	37,1	462,9	6,8	140,6	647,4	500,0
4	43,9	579,1	29,3	462,8	14,6	116,3	623,0	492,1
5	43,0	590,8	37,1	465,8	5,9	125,0	633,8	502,9
6	43,9	587,9	38,1	432,6	5,8	155,3	631,8	470,7
7	43,0	520,5	38,1	419,9	4,9	100,6	563,5	458,0
8	43,0	558,6	37,1	445,3	5,9	113,3	601,6	482,4
9	38,1	555,7	38,1	449,2	0,0	106,5	593,8	487,3
10	41,0	566,4	39,1	444,3	1,9	122,1	607,4	483,4
Ø	43,5	577,4	37,1	447,1	6,4	130,4	620,9	484,2
Max	50,8	610,0	39,1	465,8	14,6	177,4	653,9	502,9

Celková ztráta průměrné přenosové rychlosti Wi-Fi při současném vysílání činila 4,3 kB/s, což je **0,96%** z průměrné přenosové rychlosti. Naproti tomu celkový zisk přenosové rychlosti Bluetooth při současném vysílání byl 3,7kB/s, což dělá **11,04%** z přenosové rychlosti Bluetooth.

Při snížení výkonu Wi-Fi HDD se při současném vysílání obou systémů sníží průměrná přenosová rychlost Wi-Fi o 0,96%, zatímco průměrná rychlost přenosu Bluetooth se zvýší o více než 10%. Pokud by tedy tento mechanismus byl kolaborativní, do nastavení Wi-Fi by mohla být přidána možnost „Upřednostňovat WPAN,“ která by při zjištění, že vysílá zařízení Bluetooth, snížila výkon Wi-Fi a tím pádem přispěla k rychlejšímu přenosu dat systémem Bluetooth, popř. i ZigBee.

7 Shrnutí

Cílem práce bylo prostudovat a simulovat možnosti vyrušení interference mezi signály vysílanými zařízeními Wi-Fi, Bluetooth a ZigBee. Toto rušení je dáno vysokým dosahem zařízení WLAN i moderních systémů WPAN a tím pádem překrytí vysílacího prostoru. Při použití stejného frekvenčního pásma tedy zákonitě nastává vzájemné rušení signálů. Většina zařízení obsahuje kromě základní ochrany proti rušení jinými signály i koexistenční řešení navrhnuta podle standardu IEEE 802.15.2.

K simulaci v prostředí Simulink byly použity předem vytvořené modely systémů Wi-Fi a Bluetooth upravené pro účel této práce a nový model vysílače ZigBee. Hlavním koexistenčním mechanismem použitým ve výsledném modelu byl AFH – Adaptive Frequency Hopping (adaptivní frekvenční přeskakování), který upravil frekvenční přeskoky nosné signálu Bluetooth podle nosných signálů Wi-Fi a ZigBee. Vedlejším mechanismem použitým v modelu bylo pevné přidělení kombinací kanálů Wi-Fi a ZigBee, aby frekvenční rozdíly jejich nosných v rámci pásma ISM byly co nejvyšší. Zakomponování těchto mechanismů do modelu se projevilo příznivě a signály nadále mezi sebou neinterferovaly.

Praktická část práce byla zaměřená na zkoumání vlivu výkonu zařízení Wi-Fi na přenosovou rychlost Bluetooth i samotného Wi-Fi. Zařízení ZigBee nebylo do praktické části zahrnuto kvůli nedostupnosti modulu vhodného pro měření přenosové rychlosti. Měření ukázala, že během současného vysílání se systémem Bluetooth klesne při snížení výkonu Wi-Fi harddisku z 84mW na 13mW jeho průměrná rychlost o 0,96%. Zároveň se ale zrychlí přenos Bluetooth o 11,04%. V případě potřeby rychlejšího vysílání Bluetooth při současném vysílání s Wi-Fi je tedy snížení výkonu Wi-Fi jednoduchým a efektivním řešením.

8 Seznamy

8.1 Seznam použité literatury

- [1] IEEE Std 802.15.2™-2003. *IEEE Recommended Practice for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands* [online]. 2003 [cit. 2007-11-30]. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.2-2003.pdf>>
- [2] IEEE Std 802.11™-1999. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* [online]. 1999 [cit. 2007-11-25]. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>>
- [3] IEEE Std 802.11b™-1999. *Supplement to IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band* [online]. 1999. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>>
- [4] IEEE Std 802.11g™-2003. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band* [online]. 2003. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>>
- [5] IEEE Std 802.15.1™-2005. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPA N s)* [online]. 2005. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>>
- [6] IEEE Std 802.15.3™-2003. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)* [online]. 2003 [cit. 2007-12-15]. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.3-2003.pdf>>
- [7] IEEE Std 802.15.4™-2006. *IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)* [online]. 2006 [cit. 2007-12-18]. Dostupné na WWW: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>>
- [8] PROKOPEC, J.: *Personal Area Networks - Standard 802.15* [pdf]
- [9] HUANG, C.; CHIANG, H.: *Coexistence Mechanisms for Bluetooth SCO Link and IEEE 802.11 WLAN* [online]. Dostupné na WWW: <<http://csdl.computer.org/dl/proceedings/ichit/2006/2674/02/267420424.pdf>>

- [10] BRADÁČ, Z., KUČERA, P., FIEDLER, P., ZEŽULKA, F.: *Průmyslová bezdrátová síť Bluetooth pro automatizaci: výzkumná zpráva* [pdf]. VUT FEKT-AMT, 2006. 52 s.
- [11] BRZEK, T.: *Zabezpečení wi-fi sítí* [online]. Most: ČZU Praha, PEF, Veřejná správa a regionální rozvoj, 2008 [cit. 2008-06-23]. Dostupné na WWW:
<http://files.tombrzek.webnode.cz/200000000-16f9117f30/tomas_brzek_bp.pdf>
- [12] BÁRTEK, D.: *Srovnání přenosových sběrnic v měřicí technice* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2006 [cit. 2007-11-12]. Dostupné na WWW:
<https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=3336>
- [13] KOTON, J., ČÍKA, P., KŘIVÁNEK, V.: *Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee* [online]. 2006 [cit. 2007-12-05]. Dostupné na WWW:
<<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>>
- [14] WIKIPEDIA: *List of WLAN channels*. Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]. 2007 [cit. 2009-05-31]. Dostupné na WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels>
- [15] THONET, G., ALLARD-JACQUIN, P., COLLE, P.: *ZigBee – WiFi Coexistence* [online]. Grenoble: Schneider Electric, 2008 [cit. 2009-05-31]. Dostupné na WWW:
http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=13184

8.2 Seznam obrázků

obr. 2.1: Základní koncept Bluetooth zařízení [10]	5
obr. 3.1: Model architektury PHY Wi-Fi [2].....	6
obr. 3.2: Rozdělení kanálů Wi-Fi [14]	7
obr. 3.3: Model architektury PHY Bluetooth [6].....	8
obr. 3.4: Model architektury PHY ZigBee [7].....	9
obr. 4.1: Blokové schéma AFH [1]	11
obr. 4.2: Blokové schéma AIS [1]	12
obr. 4.3: Třístupňový RLSL filtr [1]	13
obr. 5.1: Model Wi-Fi	14
obr. 5.2: Model vysílače Wi-Fi	15
obr. 5.3: Fázová modulace a rozprostření signálu Wi-Fi.....	15
obr. 5.4: Frekvenční modulace signálu Wi-Fi.....	15
obr. 5.5: Model přijímače Wi-Fi.....	16
obr. 5.6: Spektrum signálu Wi-Fi v základním pásmu.....	16
obr. 5.7: Model Bluetooth.....	17
obr. 5.8: Blok GFSK modulátoru.....	17
obr. 5.9: Blok Frequency Hopping	18
obr. 5.10: Blok Frequency hopping FM Demodulator	18
obr. 5.11a: Výstupní spektrum signálu Bluetooth pro náhodný frekvenční přeskok..	19
obr. 5.11b: Výstupní spektrum signálu Bluetooth pro náhodný frekvenční přeskok..	19
obr. 5.12: Model ZigBee	19
obr. 5.13: Blok Spread.....	20
obr. 5.14: Tabulka sekvencí chipů pro rozprostírání signálu ZigBee [7]	21
obr. 5.15: Blok Signal Filtering and Frequency Modulation.....	21
obr. 5.16: I-Q diagram po modulaci O-QPSK a tvarování signálu	22
obr. 5.17: Spektrum vysílaného signálu ZigBee	22
obr. 5.18: Vizualizace propojení modelů systémů Wi-Fi a Bluetooth	23
obr. 5.19a: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a Bluetooth – bez interference	24
obr. 5.19b: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a Bluetooth – s interferencí....	24
obr. 5.20: Vizualizace propojení modelů systémů Wi-Fi a ZigBee.....	25
obr. 5.21a: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a ZigBee – bez interference...	26
obr. 5.21b: Výsledný signál spojeného signálu Wi-Fi a ZigBee – s interferencí.....	26
obr. 5.22: Vizualizace propojení modelů systémů Bluetooth a ZigBee	27
obr. 5.23a: Výsledný signál spojeného signálu Bluetooth a ZigBee – bez interference	28
obr. 5.23b: Výsledný signál spojeného signálu Bluetooth a ZigBee – s interferencí. 28	
obr. 5.24: Realizace součtu signálů ve spojeném modelu tří bezdrátových systémů 29	
obr. 5.25a: Výsledný signál spojeného signálu – bez interference	29
obr. 5.25b: Výsledný signál spojeného signálu – s interferencí	29
obr. 5.26: Řešení koexistence Wi-Fi a Bluetooth mechanismem typu AFH.....	30
obr. 5.27: Blok If Action Subsystem rozhodující o přičtení, resp. odečtení frekvence při interferenci kanálů Wi-Fi a Bluetooth.....	31
obr. 5.28: Bloky If Action Subsystem 1 a 2, které přičítají, resp. odečítají frekvenci. 31	
obr. 5.29: Srovnání přenosových kanálů Wi-Fi a ZigBee v pásmu ISM [15]	31
obr. 5.30: Tabulka frekvenčních rozdílů nosných systémů Wi-Fi a ZigBee pro určené kanály [15]	32

obr. 5.31: Upravený výběr vysílacího kanálu Wi-Fi.....	32
obr. 5.32a: Výsledné spektrum při výběru kanálu Wi-Fi 1.....	33
obr. 5.32b: Výsledné spektrum při výběru kanálu Wi-Fi 7.....	33
obr. 5.32c: Výsledné spektrum při výběru kanálu Wi-Fi 13.....	33
obr. 5.33: Řešení koexistence Bluetooth a ZigBee mechanismem typu AFH.....	34
obr. 5.34: Blok Frequency Hopping	35
obr. 5.35: Blok If Action Subsystem.....	35
obr. 5.36: Výsledné spektrum spojeného modelu.....	36
obr. 6.1: Schéma zapojení měřicí soustavy.....	37
obr. 6.2: Rušení signálu Wi-Fi signálem BT.....	37
obr. 6.3: Rušení signálu BT signálem Wi-Fi.....	38

8.3 Seznam zkratk

AFH	Adaptive frequency-hopping
AIS	Adaptive interference suppression
AP	Access Point
APS	Adaptive packet selection
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AWMA	Alternating wireless medium access
BER	Bit Error Ratio
DIS	Deterministic interference suppression
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
LSB	Least Significant Bit
MAC	Medium Access Control
MLME	MAC Sublayer Management Entity
MPDU	MAC Sublayer Protocol Data Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PHY	Physical Layer
PHY PAN	Physical Layer Private Area Network
PHY-SAP	Physical Layer Service Access Point
PIB	PAN Information Database
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PLME	Physical Layer Management Entity
PLME-SAP	Physical Layer Management Entity Service Access Point
PMD	Physical Medium Dependent
PPDU	Protocol Packet Data Unit
PTA	Packet traffic arbitration
RF	Radio Frequency
RLSL	Recursive Least-Squares Lattice
TDMA	Time-Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Private Area Network